Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 913

Daniel Czerwonka-Schröder

Konzeption einer qualitätsgesicherten Implementierung eines Echtzeitassistenzsystems basierend auf einem terrestrischen Long Range Laserscanner

München 2023

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5325-0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Qucosa – Dokumenten- und Publikationsserver der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek (SLUB)
https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa2-857419, Freiberg 2023

DGK Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 913

Konzeption einer qualitätsgesicherten Implementierung eines Echtzeitassistenzsystems basierend auf einem terrestrischen Long Range Laserscanner

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
der Technischen Universität Bergakademie Freiburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Daniel Czerwonka-Schröder, M.Sc.

geboren am 11. November 1988 in Hermeskeil

München 2023

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5325-0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Qucosa – Dokumenten- und Publikationsserver der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek (SLUB)
https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa2-857419, Freiberg 2023

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 - 331 - 288 1685 ● E-Mail post@dgk.badw.de

http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Matthias Reich

Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Benndorf

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Christoph Holst (TU München)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Klonowski (Hochschule Mainz)

Tag der mündlichen Prüfung: 25.05.2023

© 2023 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5325-0

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Mieke Kuschnerus - m.kuschnerus@tudelft.nl (Gemeinsame Durchführung der Messung, Auswertung und Interpretation der Daten zu je 50 % bei der Feldstudie in Noordwijk - Kapitel 5.1.)
- Dr. Lukas Winiwarter - lukas.winiwarter@uni-heidelberg.de (Durchführung und Bereitstellung der Algorithmik M3C2-EP und der Kalman-Filterung auf Basis von mir ausgewählter Daten. Es hat keine Interpretation der Daten durch Dr. Winiwarter stattgefunden. Die Anwendung und Bewertung unterliegen mir als Autor dieser Arbeit - Kapitel 6.2.1.)
- Dr. Katharina Anders - katharina.anders@uni-heidelberg.de (Durchführung und Bereitstellung der Algorithmik 4D-OBC auf Basis von mir ausgewählter Daten. Keine Interpretation der Daten durch Dr. Anders. Anwendung und Bewertung unterliegen mir als Autor dieser Arbeit - Kapitel 6.2.2.)

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt.

Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

25. Mai 2023 M.Sc. Daniel Czerwonka-Schröder

Kurzfassung

Sich verändernde Rahmenbedingungen des Klimawandels haben einen erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Erdoberfläche. Der Sachverhalt ist anhand unterschiedlicher geomorphologischer Veränderungsprozesse zu beobachten, sei es bei gravitativen Naturgefahren (Felsstürze, Hangrutschungen oder Murereignissen), der Gletscherschmelze in Hochgebirgsregionen oder der Änderungen der Küstendynamik an Sandstränden. Derartige Ereignisse werden durch immer stärker ausgeprägte, extreme Wetterbedingungen verursacht. In diesem Zusammenhang sind präventive Maßnahmen und der Schutz der Bevölkerung im Zuge eines Risikomanagements essentiell. Um mit diesen Gefahren sicher umgehen zu können, sind qualitativ hochwertige drei- und vierdimensionale (3D und 4D) Datensätze der Erdoberfläche erforderlich.

Der technische Fortschritt in der Messtechnik und damit verbunden ein Paradigmenwechsel haben die Möglichkeiten in der Erfassung von räumlich als auch zeitlich verdichteten Daten erheblich verbessert. Die Weiterentwicklung von terrestrischen Laserscannern hin zu kommunikationsfähigen, programmierbaren Multisensorsystemen, eine kompakte und robuste Bauweise, hohe Messreichweiten sowie wirtschaftlich attraktive Systeme lassen einen Übergang zu permanentem terrestrischen Laserscanning (PLS) zu. Im Sinne eines adaptiven Monitorings ist PLS für die Integration in echtzeitnahe Assistenz- oder Frühwarnsysteme prädestiniert. Um die Akzeptanz eines solchen Systems zu erreichen sind jedoch transparente, nachvollziehbare Methoden und Prozesse zur Informationsgewinnung und -aufbereitung zu definieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, PLS als Methode systematisch aufzuarbeiten. Vier wesentliche Schritte entlang der Prozesskette werden identifiziert: (i) Die Datenerfassung einer einzelnen Epoche, (ii) die Bereitstellung eines redundanten Datenmanagements sowie einer sicheren Datenkommunikation zu zentralen Servern, (iii) die multitemporale Datenanalyse und (iv) die Aufbereitung, das Reporting und die Präsentation der Ergebnisse für Stakeholder.

Basierend auf dieser Prozesskette ergeben sich zwei Untersuchungsschwerpunkte. Zunächst wird die qualitative Beurteilung der erfassten Punktwolken behandelt. Der Fokus liegt dabei einerseits auf dem Einfluss unterschiedlicher Registrierungsmethoden auf die multitemporalen Punktwolken und andererseits auf dem Einfluss der Atmosphäre auf die Messergebnisse. Es wird nachgewiesen, dass eine Nichtberücksichtigung dieser Einflüsse zu signifikanten Abweichungen führt, welche zu Fehlinterpretationen der abgeleiteten Informationen führen kann. Weiterhin wird gezeigt, dass es an datenbasierten Verfahren zur Berücksichtigung dieser Einflüsse fehlt. Als Grundlage für die Untersuchungen dienen umfangreiche Datensätze aus Noordwijk / Niederlande und Vals / Österreich.

Der zweite Schwerpunkt befasst sich mit der Datenanalyse. Die Herausforderung besteht darin, tausende Punktwolken einzelner Messepochen analysieren zu müssen. Bitemporale Methoden sind hier nur eingeschränkt anwendbar. Die vorliegende Arbeit stellt eine zweistufige Methode vor, mit der automatisiert Informationen aus dem umfangreichen Datensatz abgeleitet werden können. Aus der vollumfänglichen 3D-Zeitserie der Szene werden zunächst relevante Merkmale auf Basis von 2D-Rasterbildern durch Clustering extrahiert. Semiautomatisch lassen sich die extrahierten Segmente klassifizieren und so maßgeblichen geomorphologischen Prozessen zuweisen. Dieser Erkenntnisgewinn über den vorliegenden Datensatz wird in einem zweiten Schritt genutzt, um die Szene räumlich zu limitieren und in den Interessensbereichen tiefergehende Analysen durchzuführen. Auf Basis der Methoden «M3C2-EP mit adaptierter Kalman-Filterung» und «4D-Änderungsobjekten» werden zwei Analysetools vorgestellt und auf den Datensatz in Vals angewendet.

Die Überwachung topographischer Oberflächenveränderungen mit PLS wird zunehmen und eine große Menge an Daten erzeugen. Diese Datensätze müssen verarbeitet, analysiert und gespeichert werden. Diese Dissertation trägt zum besseren Verständnis der Methodik bei. Anwender bekommen durch die Systematisierung der Methode ein besseres Verständnis über die beeinflussenden Faktoren entlang der Prozesskette von der Datenerfassung bis hin zur Darstellung relevanter Informationen. Mit dieser Dissertation wird eine Toolbox vorgestellt, die es ermöglicht, multitemporale Punktwolken mit Hilfe von unüberwachtem maschinellem Lernen automatisiert auszuwerten und Informationen dem Nutzer zur Verfügung zu stellen. Dieser Ansatz ist einfach und hat ein hohes Potential für die automatische Analyse in zukünftigen Anwendungen.

Abstract

Climate change has an important impact on the scale and frequency with which the Earths surface is changing. This can be seen in various geomorphological change processes, such as gravitational natural hazards (rockfalls, landslides or debris flows), glacier melt in high mountain regions or the quantification of coastal dynamics on sandy beaches. Such events are triggered by increasingly prominent and extreme meteorological conditions. In this context, it is essential to implement preventive measures to protect the population as part of a risk management system. To safely manage these hazards, high quality three- and four-dimensional (3D and 4D) data sets of the Earth's surface are required.

Technological advances in metrology and the associated paradigm shift have significantly improved the ability to collect spatially and temporally distributed data. Progress from terrestrial laser scanners to communication-enabled, programmable multisensor systems, compact and robust design, long range and economically competitive systems allow a transition to a permanent laser scanning (PLS). PLS enables the acquisition of data from a fixed position to a target area kilometers away at high frequency and over a long period of time. In terms of adaptive monitoring, PLS is suitable for integration into near realtime assistance or early warning systems. However, in order to achieve acceptance of these systems, transparent, reproducible methods and processes for extracting information must be defined.

The aim of this thesis is to present a methodological framework for PLS. Four crucial steps along the processing chain are identifiable: (i) collecting single epoch data, (ii) providing redundant data management and secure data communication to central servers, (iii) multi-temporal data analysis and (iv) reporting and presenting results to stakeholders.

Two main research topics emerge from this processing chain. First, the qualitative assessment of the acquired point clouds, which focuses on the influence of different registration methods on the multitemporal point clouds and the influence of the atmosphere on the measured data. It is shown that ignoring these influences leads to significant deviations, which in turn can result in a misinterpretation of the derived information. It is also shown that there is still a lack of data-based procedures to account for these influences. The investigations are based on extensive data sets from Noordwijk/Netherlands and Vals/Austria.

The second research topic addreses data analysis. The challenge is to analyse thousands of point clouds per measurement epoch. In this case, bitemporal methods are limited in their applicability. The thesis presents a two-step method to automatically extract information from the large data set. In the first step relevant features are extracted from the full 3D time series of the scene based on 2D raster images by clustering. The extracted segments can then be semi-automatically classified and assigned to relevant geomorphological processes. Based on this knowledge, the scene is, in the second step, spatially delimited. Deeper analyses can then be performed in are-

as of interest. Using the «M3C2-EP method with adapted Kalman filtering» and «4D objects-by-change», two analysis tools are presented and applied to the dataset in Vals.

The monitoring of topographic surface changes with PLS will increase and generate large amounts of data. These data sets need to be processed, analysed and stored. This thesis contributes to a better understanding of the methodology. Users will gain a deeper understanding of the influencing factors along the processing chain from data acquisition to reporting of relevant information by applying the method in a systematic way. The dissertation presents a toolbox that enables automated evaluation of multitemporal point clouds using unsupervised machine learning and provides relevant information to the user. The approach is straightforward and simple and has a high potential for automated analysis in future applications.

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Dr. Jörg Benndorf und Prof. Dr. Jörg Klonowski für die Betreuung meiner Dissertation bedanken. Sie waren von der ersten Minute an von der Idee dieser Arbeit überzeugt und standen jederzeit mit Rat und Tat zur Seite. Herrn Prof. Dr. Christoph Holst danke ich für die Übernahme des Koreferats und die zahlreichen Gespräche sowie diverse Hilfestellungen im Verlauf dieser Arbeit, die direkt und indirekt damit in Verbindung standen. Der Austausch hat mir geholfen, einen alternativen Blickwinkel auf die unterschiedlichen Problemstellungen zu erhalten.

Ohne die DMT GmbH & Co. KG, vor allem ohne das gesamte Team der Abteilung «Geo Field Services & Data Management», wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Zunächst möchte ich besonders Herrn Dr. Ralf Fritschen danken, der diese Arbeit initiiert hat, mich jederzeit vollumfänglich unterstützt und mir die entsprechenden Freiräume im beruflichen Alltag geschaffen hat. Herrn Dr. Karsten Zimmermann danke ich für den fachlichen, aber auch für den persönlichen Austausch in den verschiedensten Phasen meiner Promotion. Ich danke ihm außerdem dafür, dass ich jederzeit ermutigt und unterstützt wurde, meine Ergebnisse in der Öffentlichkeit zu diskutieren, oder dass ich meinen Horizont durch weltweite Tagungsteilnahmen erweitern durfte. Mir ist es außerdem wichtig, meine Arbeitskollegen namentlich zu nennen und ihnen in dieser Weise persönlich zu danken. Hier sind besonders Ivar Chwalisz, Alexander Fleer, Gerd Palte, Andre Lüttmann, Christian Runte, Peter Meurer, Ulrich Brandt, Sven Schäfers, Markus Bank, Jörn Wagner, Jonas Wedel und Tim Hupe zu nennen, die mich jederzeit bei Messungen, Auswertungen, Programmierungen oder dem Aufbau von Hardware unterstützt haben. Ich möchte insbesondere Adam Nowacki erwähnen, der durch seine Arbeiten mit dem Laserscanner sowie seinem Ideenreichtum und konstruktiven Diskussionen erheblich zum besseren Verständnis der Thematik beigetragen hat. Martin Weber danke ich für das intensive Diskutieren von Messergebnissen und Aufbereiten unterschiedlichster 3D-Daten. Ich danke Dr. Tobias Neuffer und Dr. Moritz Fehr als langjährige Bürokollegen. Sie haben sich jederzeit mit Geduld meiner Probleme und Fragestellungen angenommen.

Im Zuge meiner Arbeit bei der DMT ist eine Kooperation mit der Fa. RIEGL entstanden, aus der ich viele Denkanstöße und Inspirationen für meine Arbeit ziehen konnte. Ich danke hier besonders Nikolaus Studnicka und Thomas Gaisecker, die mir von Beginn an zugetraut haben zu relevanten Ergebnissen zu kommen. Ihre kritischen Fragen haben mir immer wieder wichtige Impulse gegeben. Dank dieser Kooperation hatte ich stets Einblick in die technischen Entwicklungen ihrer Laserscanner, und mir wurde auch der Kontakt zur Tiroler Landesregierung hergestellt, mit deren Hilfe die ausführlichen Messkampagnen im Valsertal ermöglicht wurden. Hier möchte ich besonders Johannes Anegg und Patrick Fritzmann für die bedingungslose Unterstützung während meiner Arbeiten danken. Bei den häufigen Gesprächen mit Johannes und Patrick habe ich sehr viel über die Bedeutung von permanenten Monitoringdaten im Kontext alpiner Naturgefahren gelernt. Dieser Dank gilt auch Armin Klauser (Tiroler Landesre-

gierung) und Christine Mayerhofer (Trigonos), die mich bei der Zusammenstellung der Tachymeterdaten unterstützt haben. Für die Hilfe bei den Installationen im Valsertal danke ich besonders Erwin und Meinrad. Mein Dank gilt auch der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, die mir für die erste Messkampagne in Vals kostenlos meteorologische Daten von umliegenden Wetterstationen zur Verfügung gestellt hat.

Hilfreich für diese Arbeit waren Kontakte, die ich in den letzten vier Jahren schließen konnte. Hier möchte ich Dr. Ephraim Friedli (ETH Zürich), Gabriel Kerekes (Universität Stuttgart) und Dr. Gaël Kermarrec (Universität Hannover) für ihre Zeit und den Gedankenaustausch danken. Dieser Dank gilt auch Dr. Daniel Wujanz, der mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat. Wichtige Wegbegleiter während meiner Promotionszeit waren auch Mieke Kuschnerus (TU Delft), Dr. Lukas Winiwarter und Dr. Katharina Anders (beide Universität Heidelberg). Ihre konstruktiven Impulse ermutigten mich, an meinen Ideen weiterzuarbeiten. Der Austausch wurde durch das Beisein von Dr. Roderik Lindenbergh (TU Delft) und Prof. Dr. Bernhard Höfle (Universität Heidelberg) intensiviert. Dr. Sander Vos von der TU Delft bin ich für die Beteiligung am Projekt «CoastScan» zum Dank verpflichtet. Ich bedanke mich sehr bei den Kollegen aus Delft und Heidelberg, dass ich sie im Zuge dieser Arbeit kennenlernen durfte und freue mich auf zukünftige gemeinsame Projekte. Des Weiteren danke ich Denise Becker, Lukas Hart, Nils Kummert, Silke Sommer und Lea Vogel für ihre praktischen Untersuchungen zum Einsatz des Laserscanners und der Punktwolkenverarbeitung während ihres Studiums an der Hochschule Mainz.

Schließlich möchte ich mit besonderer Anerkennung und von ganzem Herzen meiner Frau Anne und unseren beiden Kindern Jakob und Tilda für die Zugeständnisse bezüglich dieser Arbeit danken. In den letzten Monaten und Jahren haben sie immer wieder Verständnis dafür aufgebracht, dass ich viele Abende und Wochenenden oder während des Besuchs verschiedenster Tagungen nicht zur Verfügung gestanden habe. In den schwierigen Phasen dieser Doktorarbeit wurde ich von ihnen immer wieder aufs Neue motiviert und habe Unterstützung in jeglicher Weise erhalten. Ohne ihre außergewöhnliche Geduld wäre die Arbeit am Ende in dieser Form nicht möglich gewesen. An dieser Stelle danke ich auch meinen Schwiegereltern Udo und Gabriele, die mir immer wieder den Rücken freigehalten haben und mir die Stunden am Schreibtisch, in Österreich oder auch in Chile ermöglicht haben. In gleicher Weise gilt dieser Dank Christian und Xenia sowie meiner Schwester Milena.

Abschließend danke ich meinen lieben Nachbarn Gerd und Susanne für das Lektorat meiner Dissertation und allen, die ich hier nicht persönlich aufgezählt habe, die mich aber trotzdem in vielerlei Hinsicht unterstützt haben oder mir gegenüber in den letzten Monaten verständnisvoll gewesen sind.

Anmerkung: Diese Arbeit wurde vom Forschungsfonds der Europäischen Union für Kohle und Stahl [RFCS-Projektnummer 800689 (2018)] unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung i

Abstract iii

Danksagung v

1. Einleitung 1

2. Deformationsmonitoring mittels terrestrischer Laserscanner: Aktuelle Methoden, Regulierungen und technische Aspekte 5
2.1. Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen . . . 5
2.2. Anforderungen an ein integratives Monitoring aus der Sicht eines ganzheitlichen Risikomanagements . . . 8
2.2.1. Aktives Monitoring . . . 8
2.2.2. Ganzheitliches Risikomanagement . . . 9
2.2.3. Qualitätsbeurteilung und Qualitätssicherung . . . 12
2.2.4. Relevante Normen, Richtlinien und Merkblätter beim Einsatz von permanentem Laserscanning . . . 15
2.3. Terrestrisches Laserscanning . . . 17
2.4. Permanentes Laserscanning . . . 22
2.5. Parameter einer permanenten Installation eines Long Range Laserscanners 24
2.5.1. Registrierung und Georeferenzierung . . . 26
2.5.2. Geodätische Refraktion . . . 30
2.5.3. Geodätisches Monitoring mittels terrestrischer Laserscanner . . 36
2.6. Zusammenfassende Betrachtungen . . . 39

3. Ziel und abgeleiteter Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit 41

4. Konzept eines Echtzeitassistenzsystems basierend auf PLS 43

5. Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Messergebnisse von permanent installierten terrestrischen Long Range Laserscannern 47
5.1. Fallstudie I: Noordwijk / Niederlande . . . 47
5.1.1. Beschreibung der Daten . . . 48
5.1.2. Methoden . . . 51
5.1.3. Resultate . . . 53
5.1.4. Zusammenfassung und Diskussion . . . 57
5.2. Fallstudie II: Detektion von Corner Cube Prismen und deren Genauigkeit 58
5.2.1. Prismendetektion aus Daten eines TLS . . . 59
5.2.2. Genauigkeitsanalyse der Prismendetektion . . . 59
5.3. Fallstudie III: Valsertal (Tirol) / Österreich . . . 67
5.3.1. Beschreibung des Datensatzes . . . 68

5.3.2. Geodätische Refraktion als Einfluss auf die Messergebnisse eines PLS . . . 72
5.3.3. Einfluss von Registrierungsparametern auf die Messergebnisse eines PLS . . . 89

6. Informationsextraktion aus multitemporalen Punktwolken 95
6.1. Stufe I: Segmentierung räumlich verteilter Zeitreihen auf Basis von 2D-Bildrastern als Methode des unüberwachten maschinellen Lernens . . . 96
6.1.1. Extraktion von Zeitreihen aus den Punktwolken . . . 98
6.1.2. Zeitreihensegmentierung mittels k-Means-Algorithmen . . . 101
6.1.3. Zeitreihensegmentierung mittels extrahierter Merkmale auf Grundlage Gaußscher Mischmodelle (GMM) . . . 113
6.2. Stufe II: Zeitreihenanalyse von räumlich hochauflösenden 3D-Daten . . . 122
6.2.1. M3C2-EP mit adaptiver Kalman-Filterung . . . 122
6.2.2. 4D-Änderungsobjekte (4D-OBC) . . . 128
6.2.3. Zusammenfassung und Diskussion . . . 132

7. Fazit und Ausblick 135

A. Ergebnisse der Systemuntersuchung in Unna-Hemmerde (21.03.2022) 141

B. Ergebnisse der Zeitreihensegmentierung mittels k-Means 145
B.1. Ergebnistabellen . . . 145
B.2. Zeitreihen und räumliche Visualisierung - vollständiger Bereich . . . 148
B.3. Zeitreihen und räumliche Visualisierung - limitierter Bereich . . . 161

C. Ergebnisse der Zeitreihensegmentierung mittels GMM 164
C.1. Ergebnistabellen . . . 164
C.2. Zeitreihen und räumliche Visualisierung - vollständiger Bereich . . . 166

Literaturverzeichnis 175

Abbildungsverzeichnis 195

Abkürzungsverzeichnis 199

Tabellenverzeichnis 201

Curriculum Vitae 203

1. Einleitung

Erdrutsche, Böschungsversagen und Felsstürze gehören zu den größten Gefahren für den Menschen. Sie treten in allen Teilen der Welt auf und verursachen Schäden in Milliardenhöhe, indem sie Eigentum, die Infrastruktur und die Umwelt beschädigen (Niemeier & Riedel, 2017). Das Abtauen des Permafrosts in hochalpinen Lagen und die damit verbundene Wechselwirkung von extremen Wetterlagen als Folge des Klimawandels führen vermehrt zu gravitativen Massenbewegungen in alpinen Regionen (Dinkel et al., 2021). In diesem Kontext schafft der Klimawandel neue Rahmenbedingungen, die ein zunehmendes Risiko solcher Ereignisse in Bezug auf Ausmaß und Häufigkeit darstellen (Huggel et al., 2012). Vor diesem Hintergrund sowie der Ausdehnung von urbanen Lebensräumen steigt der Bedarf an qualitativ hochwertigen drei- bzw. vierdimensionalen Datensätzen der Erdoberfläche, die es in ein ganzheitliches Risikomanagement zu integrieren gilt. Solche Datensätze sind ein zentrales Thema bei der Prävention von Naturgefahren, dem Schutz von Infrastrukturen und der Bevölkerung (Bremer et al., 2019), und deren Analyse ist ein grundlegender Bestandteil für ein besseres Verständnis geomorphologischer Prozesse (Anders et al., 2019). Unterschiedliche Stakeholder – sei es die Betreibergesellschaft einer Autobahn oder einer Bahnstrecke, aber auch auf kommunaler Ebene – haben ein hohes Interesse an qualifizierten Daten, um alltägliche Abläufe im Betrieb aufrecht zu erhalten oder bei der Prävention von Gefahren an ihren Objekten effizient Maßnahmen ergreifen zu können.

Die Ingenieurgeodäsie bietet umfassende Mittel an Messtechniken und Auswertemethoden zur Erzeugung der zuvor beschriebenen Datensätze. Wujanz (2016) beschreibt in seiner Dissertation, dass seit der methodischen Entwicklung geodätischer Deformationsmessungen zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die wesentliche Prozesskette bei der Auswertung multitemporaler Messungen unverändert ist. Die Wahl geeigneter Aufnahmestandpunkte, die Messung von mindestens zwei sogenannter Epochen, die Überführung in ein gemeinsames Koordinatensystem und die Ableitung von Deformationsvektoren beschreiben diesen Prozess. In der ursprünglichen Vorgehensweise zur Erfassung von Deformationsvorgängen wird von einem rekursiven Vorgang gesprochen. Dies bedeutet, dass bereits gewonnene Erkenntnisse oder ein gewisses Vorwissen über das Bewegungsverhalten eines zu überwachenden Objektes zur Diskretisierung sowohl im Geometrie- als auch Zeitbereich vorhanden sein muss (Heunecke et al., 2013). Die Qualität einer Überwachungsmessung korreliert direkt mit der Qualität der vorhandenen Wissensbasis über ein Messobjekt. Bewegungen, die in nicht signalisierten und damit unerkannt bleibenden Bereichen auftreten, beschreibt Wujanz (2016) ebenso als Nachteil wie die zeitaufwändige Signalisierung.

Diese Nachteile können sowohl durch den technischen Fortschritt als auch durch die damit verbundenen Weiterentwicklungen methodischer Kompetenzen innerhalb der Ingenieurgeodäsie seit Beginn des neuen Jahrtausends aufgewogen werden. U.a. Heunecke und Niemeier (2004) bezeichnen dies als Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen. Eine breite Autorenschaft (u.a. Brunner und Woschitz

(2011), Eichhorn (2012), Eichhorn (2014) oder Hennes und Heister (2007)) beschreibt damit den Übergang von bisher punktuellen und epochalen Messungen hin zu flächenhaften und kontinuierlichen Verfahren sowie die Entwicklung von zeitintensiven offline-Auswertungen hin zu komplexen online-Systemen (Niemeier & Riedel, 2017). Innovationen basieren dabei nicht ausschließlich auf dem disziplinären Umfeld der Geodäsie, sondern werden durch die allgemeine technische Evolution unterstützt. Die fortwährende Entwicklung digitaler Technologien ist als Treiber für die sogenannte vierte industrielle Revolution und damit die digitale Transformation als gesamtgesellschaftliche Thematik zu sehen (Bovenschulte et al., 2018). Entwicklungen, die den Paradigmenwechsel innerhalb der Ingenieurgeodäsie bzw. den digitalen Wandeln im Allgemeinen gestalten, werden beispielsweise unter den Ideen, Konzepten und Anwendungsfeldern Big Data, Internet of Things, Machine-to-Machine-Communication, Smart Products und Services aggregiert (Hungerland et al., 2015). Instrumenten- und verfahrenstechnische Entwicklungen in vielfältiger Art und Weise sowie deren große Dynamik haben einen positiven Einfluss auf Methoden und Möglichkeiten der Modellbildung bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen (Heunecke et al., 2013). Der methodische Transfer eröffnet neue Möglichkeiten bei der Fragestellung geometriebezogener Problemstellungen. Entwicklungen, die über die Messtechnik hinausgehen, beispielsweise im Bereich des Datenmanagements und der Datenkommunikation, machen Messaufgaben möglich, die bis vor ein paar Jahren undenkbar waren.

Als exemplarisch für den hier beschriebenen Entwicklungsprozess ist das terrestrische Laserscanning (TLS) zu nennen. TLS wird für eine Vielzahl unterschiedlicher Deformationsanalysen eingesetzt (Holst et al., 2017a), und die Messtechnik ist innerhalb der Ingenieurgeodäsie etabliert. Technische Erweiterungen des TLS hin zu kommunikationsfähigen, programmierbaren Multisensorsystemen, eine kompakte und robuste Bauweise, hohe Messreichweiten machen eine Weiterentwicklung zu permanentem TLS (PLS) möglich. Zu vermessende Objekte lassen sich flächenhaft und mit einer hohen zeitlichen Auflösung nahezu kontinuierlich erfassen. Ein Vorwissen zum Bewegungsverhalten eines Objektes ist nur noch im begrenzten Maße notwendig, und eine Signalisierung ist aufgrund der reflektorlosen Messtechnik obsolet. Infolge dieser Entwicklungen sind die Anwendungsfelder divers und haben nach Wujanz (2016) das klassische Tätigkeitsfeld des Ingenieurgeodäten erweitert. Neue Tätigkeitsfelder können bspw. den Disziplinen der Geomorphologie, Archäologie und den Umweltwissenschaften zugeordnet werden, bei denen natürliche Objekte von Interesse sind (Wujanz, 2016). Einschlägige Anwendungsbeispiele aus der Ingenieurgeodäsie heraus sind beispielsweise in Eling (2009), Gojcic et al. (2020), Harmening und Neuner (2020), Holst et al. (2015), Lindenbergh und Pfeifer (2005), Paffenholz et al. (2017), Serantoni und Wieser (2016) sowie Wunderlich et al. (2020) zu finden und werden bei Neuner et al. (2016) und Mukupa et al. (2017) zusammenfassend dargestellt.

Es überwiegen jedoch nicht alleine Vorteile, sondern der Paradigmenwechsel bedeutet auch die Adaption bereits bekannter Denkweisen und ingenieurgeodätischer Methoden an die neuen Möglichkeiten, die Herausforderungen in vielfältiger Weise mit sich bringen. Insbesondere beim Einsatz von PLS als Frühwarnung innerhalb eines Risikomanagementsystems sind Fehlalarme oder Missinterpretationen der Resultate aufgrund fehlerhafter Signifikanzniveaus oder systematischer Messabweichungen in jedem Fall zu vermeiden. Messergebnisse eines TLS unterliegen verschiedenen zufälligen und systematischen Abweichungen und legen damit das stochastische Modell fest (Kuhlmann

& Holst, 2017). Bei der Anwendung von PLS kommen überwiegend Long Range Laserscanner mit Reichweiten von bis zu wenigen Kilometern zum Einsatz. PLS machen systematische Einflüsse sichtbar, die bei kampagnenweisen Messungen zu ausgewählten Zeitpunkten weniger dominant sind. Die Ursachenforschung ist herausfordernd, da zeitabhängige Einflüsse in den Ergebnissen ähnlich aussehen, jedoch unterschiedliche Ursachen haben können. Aktuelle Fragestellungen setzen sich mit Registrierungsmethoden multitemporaler Datensätze und dem Einfluss atmosphärischer Refraktion auseinander.

Qualifizierte Daten als Grundlage lassen sich nur im Zuge eines problemspezifischen Monitoringkonzeptes erfassen (Niemeier & Riedel, 2017). Methodische Entwicklungen gehen heutzutage über die eigentliche Messaufgabe hinaus und machen es unerlässlich, dass zur zielgerichteten Konzeption das gesamte Monitoringsystem als auch die Prozessketten – vor allem auch die Entscheidungsprozesse eines Auftraggebers – zu verstehen. Nach Heunecke et al. (2013) werden Überwachungsmessungen zu einer Steuerungs- und Regelungsaufgabe und es geht zunehmend um die Integration in das Prozessgeschehen. Kuhlmann et al. (2013) beschreiben, dass der Begriff der Ingenieurgeodäsie den kompletten Methodenschatz zur Auswertung, Modellierung der Messgrößen sowie daraus abgeleiteter Schätzgrößen umfasst und nicht lediglich die technische Vermessung alleine. Der Ingenieurgeodät transferiert die erhobenen Daten zu Informationen. «*Als wesentliches Merkmal hat sich dabei die kompetente Bearbeitung geometriebezogener Fragestellungen unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsprinzips und mit durchgreifender Qualitätsbeurteilung von der Planung über die Messung bis zur Auswertung und Interpretation gezeigt. Die Aufgabenstellungen bzw. Anwendungsfelder liegen fast ausschließlich im interdisziplinären Umfeld und fordern vom Ingenieurgeodäten daher in besonderem Maße auch Kenntnisse und Verständnis übergeordneter Prozesse der Nachbardisziplinen.*» (Kuhlmann et al., 2013) PLS ermöglicht eine hochfrequente Datenerfassung über vergleichsweise lange Zeiträume. Dies birgt die Herausforderung, tausende Punktwolken der einzelnen Messepochen analysieren zu müssen. Neue Methoden verwenden daher die vollständige Zeitserieninformation der 4D-Datensätze zur Detektion und Extraktion von Oberflächenaktivitäten sowie zur Charakterisierung von Änderungen. Bisher sind diese Algorithmen jedoch nicht für die Anwendung im Rahmen eines echtzeitnahen Assistenzsystems optimiert.

Monitoringsysteme – unabhängig vom Anwendungsfall – zeichnen sich beispielsweise nicht primär durch die höchste Messgenauigkeit aus; vielmehr ist eine Akzeptanz des Systems, und daraus resultierend Vertrauen, von mindestens genauso großer Bedeutung. Vertrauen und Akzeptanz bei den unterschiedlichen Stakeholdern werden durch transparente und nachvollziehbare Methoden und Prozesse zur Informationsgewinnung geschaffen. Zur Implementierung eines Laserscanners innerhalb eines integrativen Monitoringsystems gehören somit nicht nur der Sensor an sich, sondern auch die Nutzer, die Umwelt, Algorithmen zur Datenbearbeitung, das Datenmanagement, die Transformation von Daten hin zu Informationen und das zu beobachtende Objekt selbst.

Der technologische Fortschritt terrestrischer Laserscanner hin zu PLS, die damit verbundene Adaption der Methodik innerhalb eines ingenieurgeodätischen Monitorings und - daraus aufkommend - unterschiedliche Forschungsthemen aus den Bereichen der Registrierung multitemporaler Datensätze, des Einflusses atmosphärischer Refraktion sowie der Notwendigkeit einer automatischen Informationsextraktion motivieren zur Verfassung dieser Dissertation.

2. Deformationsmonitoring mittels terrestrischer Laserscanner: Aktuelle Methoden, Regulierungen und technische Aspekte

Kapitel 2 gibt einen Überblick zum aktuellen Wissensstand innerhalb der relevanten Arbeitsgebiete, die diese Arbeit beinhaltet. Die Integration eines terrestrischen Long Range Laserscanners soll unter ingenieurgeodätischen Gesichtspunkten erfolgen. Aus diesem Grund werden zunächst die Begriffe Ingenieurgeodäsie, Überwachungsmessung, aktives Monitoring und ganzheitliches Risikomanagement definiert. Anschließend erhält der Leser einen Überblick zu den Anforderungen an ein integratives Monitoring, das sich nicht alleine auf die Ingenieurgeodäsie konzentriert. Für diesen Überblick ist es notwendig, die Begrifflichkeiten eines ganzheitlichen Risikomanagements und die Qualitätssicherung zu diskutieren als auch aktuelle normative Aspekte aufzulisten, die die hier vorgestellte Thematik tangieren.

Im zweiten Teil dieses Kapitels geht es um mathematisch-technische Beschreibungen. Es werden aktuelle Erkenntnisse einer ingenieurgeodätischen Überwachung mittels TLS und dessen Evolution hin zu PLS dargelegt und unter Berücksichtigung des Messprinzips präsentiert. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Beschreibung wesentlicher limitierender Einflussfaktoren auf die Messergebnisse eines Long Range Laserscanners. Diese Doktorarbeit konzentriert sich dabei auf die Themen Registrierung und Georeferenzierung, geodätische Refraktion und der Informationsextraktion aus Punktwolken.

2.1. Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen

Niemeier (2008) beschreibt, dass bei traditioneller Denk- und Arbeitsweise in fast allen Teilgebieten der Geodäsie von statischen und somit grundsätzlich unveränderlichen Situationen ausgegangen wird. Aufgabe ist es, die jeweiligen Untersuchungsprojekte mit geforderter Qualität geometrisch zu vermessen. Die Helmertsche Definition «Geodäsie ist die Wissenschaft von der Abmessung und Abbildung der Erdoberfläche» (Helmert, 1880) wird 1975 durch die Internationale Assoziation der Geodäsie (IAG) um den Zusatz «. . . einschließlich des Schwerefeldes und zeitlicher Veränderungen.» erweitert. Damit wird anerkannt, dass es eine Vielzahl zeitveränderlicher Phänomene und Probleme gibt, die mit dem Methodensatz der Geodäsie bearbeitbar sind (Niemeier, 2008). Geodätische Methoden werden u.a. genutzt um geodynamische Phänomene zu studieren, oder zur Überwachung der tatsächlichen geometrischen Veränderungen von

Bauwerken. Daraus lässt sich folgern, dass durch modifizierte Aufgabenstellungen die Bearbeitung zeitlich veränderlicher Größen eine zunehmende Rolle spielt und die Bestimmung geometrischer Veränderungen von herausragender Bedeutung ist (Niemeier, 2008).

Auf Basis dieses Umdenkens sind ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen heutzutage ein wesentlicher Bestandteil der Ingenieurgeodäsie. Wieser et al. (2017) beschreiben, dass unter Überwachungsmessungen in der Ingenieurgeodäsie insbesondere die messtechnische Erfassung des geometrischen Ist-Zustandes eines Objektes und der Vergleich desselben mit den Ist-Zuständen der Vergangenheit verstanden werden. Die Detektion geometrischer Veränderungen in Form von Starrkörperbewegungen und Verformungen ist das Ziel und diese in Relation zu den Ursachen der Deformationen zu setzen.

Das Vorgehen ist seit Jahren insofern unverändert, dass in der klassischen Geodäsie von punktuellen Messungen ausgegangen wird. Bewegungen an einem Objekt werden beschrieben, indem signalisierte Messpunkte aus einem stabilen Referenznetz heraus wiederholt eingemessen werden (Eichhorn et al., 2017). Um diese Differenzen signifikant detektieren zu können, wird ein Messkonzept (zeitlich und räumlich) individuell an ein Messobjekt angepasst. Für eine zielgerichtete Konzeptionierung eines Überwachungsprogramms an einem zu vermessenden Objekt sind zunächst die möglichen Ursachen der erwarteten Deformationen, ihre Variation als auch die Ausdehnung des beeinflussten Bereichs in Erfahrung zu bringen (Heunecke et al., 2013). Neben intuitiven Annahmen ist der Austausch mit den jeweils beteiligten Fachdisziplinen (Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Ingenieurgeologie oder bspw. Geophysik) von besonderer Bedeutung.

Der Messung folgend ist eine anwendungsbezogene Datenanalyse im kongruenten, kinematischen, statischen oder dynamischen Modell durchzuführen (Eichhorn et al., 2017). Wolf (1975) beschreibt, dass Messungen in gewissen Grenzen immer fehlerbehaftet sind. Bei der Messkonzeption ist der Entwurf immer so zu gestalten, dass Ungenauigkeiten unterhalb des Niveaus der zu erwartenden Deformation liegen. Während des Prozesses vom Entwurf eines Überwachungsmesssystems hin bis zur Realisierung wird eine Optimierung hinsichtlich Sensitivität gegenüber kritischen Deformationen sowie geringer Fehlalarmrate, Robustheit und weiterer technischer und nicht-technischer Kriterien zugrunde gelegt (Wieser et al., 2017). Im Bereich der Geodäsie haben sich hinsichtlich dieser Optimierung neben der Messtechnik auch verschiedene Analysemethoden etabliert. Nach Wieser et al. (2017) hat sich in der Ingenieurgeödäsie ein eigenständig entwickeltes Spektrum an statistischen Methoden durchgesetzt, das es erlaubt, Veränderungen unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten und Modelle nachzuweisen. Neumann (2009) fasst zusammen, dass die Wechselwirkung zwischen Information und Unsicherheit eine wesentliche Rolle spielt, wenn die erhobenen Daten in Modellen zusammengeführt werden. Die geodätische Datenanalyse zeichnet sich durch die Beurteilung aus, ob die abgeleiteten Informationen statistisch signifikant sind. Die Bewertung kann nur unter der Annahme einer methodisch korrekten und realistischen Unsicherheitsmodellierung erfolgen (Neumann, 2009). Im einfachen Fall wird bei der klassischen Deformationsanalyse überprüft, ob die Netzgeometrie zwischen zwei Messepochen kongruent ist. Dies geschieht nach Niemeier (2008) grundlegend mittels eines globalen Kongruenztests, der im Modell der linearen Hypothesenprüfung formuliert wird. Der Ablauf und das Vorgehen sind u.a. in Niemeier (2008) detailliert beschrie-

ben. Problematisch ist bei den Hypothesentests die unzureichende Kenntnis des Signifikanzniveaus, sodass eine Nullhypothese H_0 nur mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $P = 1 - \alpha$ angenommen werden kann. Nach Niemeier (2008) bezeichnet α somit die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme einer Nullhypothese H_0. Es wird von einem Fehlschuss 1. Art gesprochen, wenn eine Prüfgröße verworfen wird, obwohl sie eigentlich zu H_0 gehört (Niemeier, 2008). Dem gegenüber ist eine andere Fehlentscheidung, die Nullhypothese H_0 anzunehmen, obwohl sie falsch, die Alternativhypothese H_A also richtig ist (Heunecke et al., 2013). Es wird vom Fehlschluss 2. Art gesprochen, wenn die Nullhypothese H_0 angenommen wird, obwohl sie falsch ist (Niemeier, 2008). Die Wahrscheinlichkeit, die richtige Alternativhypothese H_A zu verwerfen, wird mit β bezeichnet (Heunecke et al., 2013). Heunecke et al. (2013) beschreiben, dass die Entscheidung für eine Ablehnung der Nullhypothese mit der Wahrscheinlichkeit $\gamma = 1 - \beta$ richtig ist. Daher wird mit diesem Kriterium u.a. die Trennschärfe oder Macht eines Tests definiert. Je kleiner bei gegebenen α die Wahrscheinlichkeit β ist, umso größer ist die Nichtzentralität λ. Eine größere Nichtzentralität deutet darauf, dass der Test die Hypothesen schärfer trennt. Der gegensätzliche Fall ist derjenige, dass mit abnehmender Wahrscheinlichkeit α bei sonst gleichen Bedingungen die Wahrscheinlichkeit β für einen Fehlschluss 2. Art wächst. Sichere Aussagen sind somit unscharf (Heunecke et al., 2013). Ein Optimum zwischen den Wahrscheinlichkeiten α und β bzw. die konkrete Angabe einer Nichtzentralität ist bei geodätischen Entscheidungen schwierig (Heunecke et al., 2013). Nach Niemeier (2008) sind geringe Abstände zwischen H_0 und H_A kritisch zu bewerten – sogar zu vermeiden. Tabelle 2.1 fasst das Beschriebene zusammen. Das Ergebnis wird aussagekräftig durch die Optimierung des Messverfahrens und der damit verbundenen Genauigkeitssteigerung, die wiederum für einen möglichst großen Abstand zu H_0 sorgt und damit für eine hohe Testgüte. Dieses mathematisch-statistische Zusammenspiel ist fundamental bei der Konzeption eines Überwachungssystems. Eine Optimierung minimiert Fehlalarme und schafft somit Akzeptanz und Vertrauen bei den diversen Nutzern eines Monitoringsystems.

Tab. 2.1.: Zusammenspiel des Fehlschlusses 1. und 2. Art bei der Überprüfung von Null- und Alternativhypothese.

		Wirklichkeit	
		H_0 wahr	H_0 falsch
Testentscheidung	H_0 beibehalten	Richtige Entscheidung mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $P = 1 - \alpha$	Entscheidung ist mit der Wahrscheinlichkeit β irrtümlich (Fehlschluss 2. Art)
	H_0 verwerfen	Entscheidung ist mit der Wahrscheinlichkeit α irrtümlich (Fehlschluss 1. Art)	Richtige Entscheidung mit einer Wahrscheinlichkeit von $\gamma = 1 - \beta$

Zusammenfassend lässt sich beschreiben, dass die Anerkennung zeitlicher Veränderungen sowie die Etablierung ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen als Subdisziplin hinsichtlich Methodik und Qualitätssicherung eine ideale Grundlage für die

Konzeption dieser Arbeit liefern. Aus einer konservativen Sicht halte ich die Definition von Kuhlmann et al. (2013) im Kontext dieser Arbeit für angemessen und sehe sie als Fundament für die weitere Bearbeitung.

> Die Ingenieurgeodäsie ist die Disziplin von der Aufnahme, der Absteckung und dem Monitoring lokaler und regionaler geometriebezogener Phänomene mit besonderer Berücksichtigung von Qualität, Sensorik und Bezugssystemen. (Kuhlmann et al., 2013)

Ziel geodätischer Überwachungsmessungen soll eine möglichst vollständige Aussage zu dem Verhalten eines Messobjektes sein (Heunecke, 2014). Heutige Methoden zur Deformationsanalyse basieren im Wesentlichen auf der Beschreibung von Punkten. Aktuelle Forschungsthemen befassen sich jedoch mit dem Transfer dieser Methoden auf die Objekterfassung durch bildgebende oder scannende Messverfahren (Wieser et al., 2017). Dank des technischen Fortschritts und paralleler Adaption methodischer Kenntnisse wird das Aufgabenspektrum der Ingenieurgeodäsie in den kommenden Jahren stetig zunehmen.

2.2. Anforderungen an ein integratives Monitoring aus der Sicht eines ganzheitlichen Risikomanagements

In der Fachliteratur, bei wissenschaftlichen oder aber auch professionellen Diskussionen wird der Geodät unter anderem mit den Begriffen des Monitorings, des Geomonitorings, der Deformationsanalyse, der Überwachungsmessung, der Beweissicherung oder in seltenen Fällen auch mit den Begrifflichkeiten Beobachtungsmethode oder Structural Health Monitoring (SHM) konfrontiert. Eine Einordnung dieser Begrifflichkeiten an sich und in einem übergeordneten Kontext ist im Rahmen der weiteren Ausführungen dieser Arbeit wichtig.

2.2.1. Aktives Monitoring

Durch die zunehmende Internationalisierung der Geodäsie hat sich der englische Ausdruck *Monitoring* durchgesetzt und wird im Bereich der Geodäsie als auch der Geoinformation synonym für geodätische Überwachungsaufgaben verwendet (Wunderlich, 2006). In diesem Kapitel soll der Begriff zunächst übergeordnet betrachtet und beschrieben werden. Beim Monitoring handelt es sich grundsätzlich um die unmittelbare Erfassung aller Arten systematischer Veränderungen an einem zu überwachenden Objekt (Niemeier, 2011). Daher ist die Begriffsverwendung über die Geodäsie hinaus berechtigt und findet beispielsweise auch in der Gebäudeautomation Anwendung (DIN EN ISO 16484-2:2004-10, 2004), sodass die jeweiligen Definitionen d'accord gehen. In der DIN EN ISO 16484-2:2004-10 (2004) wird von der Beobachtung des Ist-Zustandes einer Einheit und der daraus resultierenden Signalisierung einer definierten Abweichung vom Normzustand und somit nicht alleine von der Erfassung geometrischer Messgrößen gesprochen, wie diese von einem Geodäten verstanden werden.

Der Ingenieurgeodät ist nach Eichhorn et al. (2017) wiederum nicht nur für das Feststellen von geometrischen Unregelmäßigkeiten zuständig, sondern auch für anschlie-

ßende Fragestellungen, welcher Schadenstyp vorliegt (Klassifizierung), warum es dazu gekommen ist (Kausalität), wie groß das Schadensausmaß bereits ist und wie sich die Sachlage mutmaßlich weiter entwickeln wird (Prognose). Methoden der Ingenieurgeodäsie erlauben es beispielsweise, kausale Zusammenhänge zu verifizieren (Eichhorn, 2012). Die große Herausforderung liegt in der integrierten Auswertung und ist daher schon jetzt als stets interdisziplinäre Aufgabe zu verstehen. Eichhorn (2012) beschreibt außerdem, dass zu einem *ganzheitlichen Monitoring* nicht nur die Überwachung der Geometrie eines Bauwerks gehört, sondern auch das Monitoring von geologischen Strukturen oder geotechnischen Objekten sowie der Umweltbedingungen. Interdisziplinarität ist daher in der Ingenieurgeodäsie als oberstes Gesetz zu verstehen und ist heutzutage im Alltag nicht fremd (Wunderlich, 2006). So können nach Wunderlich (2006) innerhalb eines Monitorings gegenwärtig viele weitere Disziplinen der Geodäsie und Geoinformation beteiligt sein.

Nach Eichhorn et al. (2017) und Resnik (2021) hat der technische Fortschritt dazu geführt, dass das Monitoring als Bestandteil eines Regelkreises anzusehen ist. Auf messtechnisch festgestellte Reaktionen eines Messobjektes müssen unmittelbar sowie automatisch bestimmte Aktionen (konkret organisatorisch bzw. bautechnische Maßnahmen) unter Einbeziehung von Expertise erfolgen. Speziell bei einem Frühwarnsystem für Hangrutschungen besteht der Regeleingriff darin, geeignete Maßnahmen zur Schadensminimierung bis hin zur Evakuierung zu treffen, wenn ein Großereignis nicht auszuschließen ist. Dieses Vorgehen wird als aktives Monitoring bezeichnet.

2.2.2. Ganzheitliches Risikomanagement

Abgrenzend zu den technisch-methodischen Beschreibungen eines aktiven Monitorings und deren Einordnung im ingenieurgeodätischen Kontext, sind organisatorische Rahmenbedingungen zu definieren. Bei einem Monitoring können wie zuvor beschrieben verschiedene Akteure zum Tragen kommen. So sind es beispielsweise Beteiligte aus dem Facility Management, die den Energieverbrauch innerhalb einer technischen Anlage überwachen oder bei der Maschinendiagnose die Temperatur, den Öldruck oder Verschleiß eines Aggregats messen. Ergänzend dazu sind das geophysikalische, geotechnische oder in dem hier vorliegenden Fall geodätische Monitoring möglich. Das Monitoring aus den unterschiedlichen Disziplinen heraus und dessen Integration in einen Regelkreis sind lediglich das Handwerkszeug zur Messdatenerfassung und Beschreibung der kausalen Zusammenhänge. Wenn nach Wieser et al. (2017) diese Zusammenhänge zusätzlich verstanden sind, kann ein Monitoring in vielen Fällen genau da von Nutzen sein, wo Risiken durch diese Vorhersage reduziert werden. Nach Abbildung 2.1 ist das Monitoring als Teil eines ganzheitlichen Risikomanagements anzusehen.

Neben der Bewältigung der Messaufgabe selber ist die Akzeptanz verschiedener Interessengruppen ein wesentliches Kriterium einer erfolgreichen Umsetzung von öffentlichen Projekten (Benndorf, 2021). Benndorf führt aus, dass das damit verbundene Risiko fehlender Akzeptanz das Risiko des Entzugs der «Social-Licence-to-Operate» erhöht und seit mehr als einer Dekade eine der größten Herausforderungen darstellt. Deshalb sind bei der Projektimplementierung allgemein anerkannte Grundsätze zu berücksichtigen, um Risiken im Allgemeinen zu minimieren. Im Zuge dieser Arbeit wird als Leitfaden die DIN ISO 31000:2018-10 (DIN ISO 31000:2018-10, 2018) genutzt. Bartelt und Wieben (2017) beschreiben, dass sich trotz fehlender Zertifizierbarkeit die

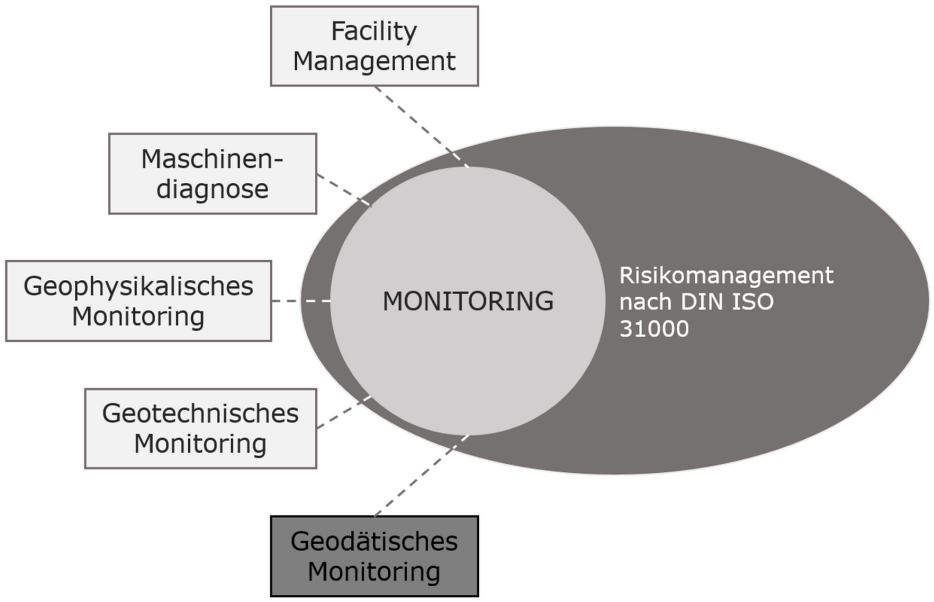


Abb. 2.1.: Monitoring als Teil eines Risikomanagements nach DIN ISO 31000 und Zuordnung von Subdisziplinen.

Norm als international akzeptierter Standard durchgesetzt hat. Diese Norm dient als Implementierungsempfehlung, unabhängig vom fachlichen Kontext, da sie sich generell an Personen richtet, die Werte in Organisationen schaffen und bewahren, indem sie mit Risiken umgehen, Entscheidungen treffen, Ziele festlegen und erreichen sowie Leistung verbessern (DIN ISO 31000:2018-10, 2018). In den hier vorliegenden Betrachtungen wird nach Gabler (2022) von einer «Organisation» gesprochen, wenn eine Gruppe von Personen in einem arbeitsteiligen Prozess mit Kontinuität an einer gemeinsamen Aufgabe infolge eines gemeinsamen Zieles arbeitet. In dem hier vorliegenden Kontext können gemeinsame Aufgaben bspw. die Absicherung von Verkehrswegen unterhalb eines Rutschhanges sein, der Betrieb einer Talsperre oder über- als auch untertägiger Bergbau. Externe und interne Faktoren sowie Einflüsse jeglicher Art und Größe beeinflussen Organisationen und machen das Erreichen bestimmter Ziele unsicher. Zudem wird in der Norm festgelegt, dass der Umgang mit Risiken Teil aller Aktivitäten einer Organisation sind und die Interaktion mit Stakeholdern beinhaltet. Stakeholder sind hier Personen oder Organisationen, die eine Entscheidung oder Aktivität beeinflussen können, von dieser beeinflusst werden oder den Eindruck haben, davon beeinflusst zu werden (DIN ISO 31000:2018-10, 2018).

Die DIN ISO 31000:2018-10 (2018) gibt mittels beschriebener Grundsätze eine Anleitung zu den Eigenschaften eines wirksamen und effizienten Risikomanagements an. Sie bilden die Grundlage für das Umgehen mit Risiken und sollten bei der Entwicklung des Rahmenwerks und der Prozesse berücksichtigt werden (DIN ISO 31000:2018-10, 2018). Die Grundsätze werden in der Abbildung 2.2 dargestellt und in der Norm ausführlich beschrieben.

Neben den Grundsätzen ist das Rahmenwerk eines Risikomanagements von entscheidender Bedeutung. Der Zweck besteht darin, die Organisation dabei zu unterstützen, das Risikomanagement in deren bedeutende Aktivitäten und Funktionen zu integrieren (DIN ISO 31000:2018-10, 2018). Die Norm beschreibt, dass die Integration das Verständnis der Strukturen und des Kontextes einer Organisation erfordert. Die In-



Abb. 2.2.: Grundsätze zu den Eigenschaften eines wirksamen und effizienten Risikomanagements. Darstellung auf Basis der DIN ISO 31000:2018-10 (2018).

tegration wird als dynamischer und iterativer Prozess verstanden und sollte an die Bedürfnisse und die Kultur angepasst sein (DIN ISO 31000:2018-10, 2018). Bei der Gestaltung ist der Umgang mit Risiken im externen und internen Kontext entscheidend. Es sind soziale, kulturelle, politische, rechtliche, behördliche, finanzielle, technologische, wirtschaftliche und umweltbezogene Faktoren, seien sie internationaler, nationaler, regionaler oder lokaler Art, zu berücksichtigen (DIN ISO 31000:2018-10, 2018). Der Risikomanagementprozess (Abb. 2.3) setzt die beschriebenen Grundsätze und das Rahmenwerk im konkreten Anwendungsfall um und umfasst die systematische Anwendung von Prozessen auf essentielle Aktivitäten (DIN ISO 31000:2018-10, 2018). Kommunikation und Konsultation als Teil dieser Aktivitäten zielen darauf ab,

- Fachkenntnisse aus verschiedenen Bereichen in jedem Schritt des Risikomanagementprozesses zu vereinen;
- sicherzustellen, dass verschiedene Ansichten bei der Definition der Risikokriterien und beim Bewerten von Risiken angemessen berücksichtigt werden;
- ausreichende Informationen zu liefern, um die Überwachung der Risiken und die Entscheidungsfindung zu ermöglichen;
- unter den von Risiko betroffenen Kreisen einen Eindruck des Eingebunden- und Betroffenseins zu schaffen (DIN ISO 31000:2018-10, 2018).

Der Anwendungsbereich bzw. der Kontext des Risikomanagements ist klar zu definieren, und daraus sind sowohl Risikokriterien als auch die Beurteilung des Risikos abzuleiten. Resultierend daraus muss klar sein, wie beim Eintreten eines bestimmten Risikos damit verfahren wird. Die letzten beiden Aktivitäten in Form des Überwachens und Überprüfens sowie des Aufzeichnens und Berichtens können wiederum als Monitoringaufgabe i.S. dieser Arbeit verstanden werden. In Anlehnung an die Norm und transferiert auf das konkrete Beispiel einer Hangrutschung kann in Abbildung

2.3 zusammengefasst werden, dass auf Grundlage einer Risikobeurteilung (inkl. Risikoidentifikation, Risikoanalyse, Risikobewertung) und festgelegten Risikobehandlung zielgerichtet ein Monitoringsystem zu integrieren ist. Neben der ingenieurgeodätischen Überwachung sind Ergebnisse zu dokumentieren und mit den Stakeholdern in einer adäquaten Weise zu kommunizieren. Die machen ein ganzheitliches Prozessverständnis und umfassendes methodisches Wissen unabdingbar.

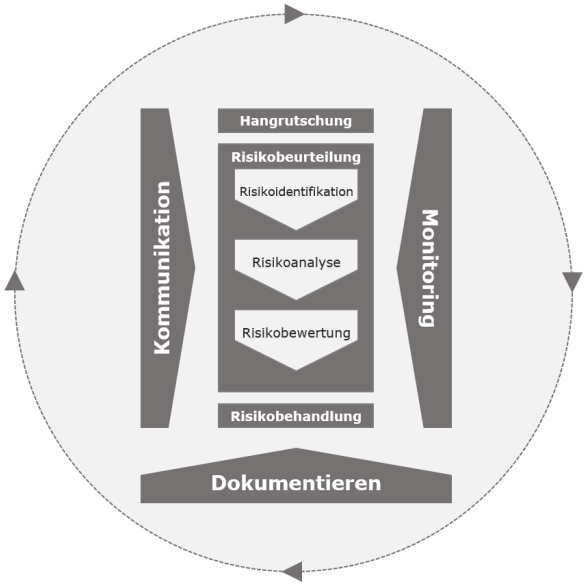


Abb. 2.3.: Darstellung des Risikomanagementprozess für eine Hangrutschung u.a. als systematische Anwendung von Grundsätzen. Darstellung auf Basis der DIN ISO 31000:2018-10 (2018).

2.2.3. Qualitätsbeurteilung und Qualitätssicherung

Bisher ist in dieser Arbeit beschrieben, wie eine ingenieurgeodätische Überwachungsmessung heutzutage definiert wird und wie sie innerhalb eines ganzheitlichen Risikomanagements einzuordnen ist. In der Einleitung dieser Arbeit wird dargelegt, dass der Bedarf an qualitativ hochwertigen Datensätzen der Erdoberfläche steigt bzw. Stakeholder ein hohes Interesse an qualifizierten Daten haben. Daher stellt sich die Frage, wie im Rahmen eines modernen geodätischen Monitorings Qualität zu verstehen ist und wie sie im Zuge eines Risikomanagements gesichert werden kann. Dieses Kapitel soll einen Überblick zu den Begrifflichkeiten geben und die hier vorgestellte Implementierung eines Long Range Laserscanners innerhalb eines webbasierten Monitoringsystems in diesem Zusammenhang beschreiben. Das Kapitel ist in zwei Teile aufgeteilt. Zum einen wird die Qualität der Messung und zum anderen qualitativ die Implementierung des Systems beschrieben.

Nach W. Schwarz und Hennes (2017) können aus wirtschaftlichen und/oder technischen Gründen Messungen nicht so genau ausgeführt werden, dass sie als wahre Werte anzusehen sind. Deshalb sind sie für ihren weiteren Gebrauch mit einem Unsicherheitsmaß zu versehen, das die Qualität der Messung ausdrückt (W. Schwarz & Hennes, 2017). Schwarz & Hennes beschreiben weiter, dass u.a. die Unvollkommenheit der Messverfahren, Einflüsse der Umwelt oder persönliche Einflüsse die Qualität repräsentieren. Problematisch bei der Bestimmung der Messunsicherheiten ist heute, dass die unvollständige Kenntnis des Wertes einer Messgröße nicht mehr ausschließlich aus zufällig

streuenden Messwerten besteht (Neumann & Alkhatib, 2022), sondern systematische Messeinflüsse eine besondere Rolle spielen (W. Schwarz & Hennes, 2017). Die Summe an Abweichungen wird durch das Vorhandensein von groben Messfehlern komplettiert - wird hier aber nicht weiter betrachtet. Die Komplexität moderner Messsysteme sorgt dafür, dass (systematische) Einflüsse oft unbekannt sind oder nur unzureichend modelliert werden können, was wiederum zu einer Vergrößerung der Messunsicherheit führt (W. Schwarz & Hennes, 2017). Wegen des Fehlens von statistischen Informationen über diese Einflüsse beschreibt Neumann, dass ein quantitativer Beitrag mit Hilfe konventioneller Statistik nicht erfassbar ist. U.a. Hennes und Heister (2007), Niemeier (2008), Neitzel (2010) oder Benning (2011) beschreiben, dass klassische Ausgleichungsalgorithmen zwar bei Vorhandensein überbestimmter Messdaten umfassende Genauigkeitsaussagen liefern, diese jedoch bei unzureichend berücksichtigten systematischen Einflüssen hinsichtlich Präzision und Richtigkeit der Messwerte kritisch zu betrachten sind.

Nach W. Schwarz und Hennes (2017) ist es daher zwingend notwendig, den hier beschriebenen Umstand in der Weise zu berücksichtigen, dass die in der Ausgleichung berechneten Standardabweichungen der Unbekannten mittels Varianzfortpflanzung um die nicht in der Ausgleichung berücksichtigten Messunsicherheiten zu ergänzen. Für eine sachgerechte Bewertung und Angabe der Messunsicherheit hat sich der von der ISO herausgegebene «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement», kurz GUM, als international akzeptierter Standard durchgesetzt (Sommer & Siebert, 2004). Ziel des GUM ist es, eine international einheitliche Vorgehensweise bei der Ermittlung von Messunsicherheiten anzustreben (W. Schwarz, 2020). Für alle Stakeholder – um den Kontext des Monitorings wieder aufzugreifen – gewinnt die Ableitung von Messunsicherheiten dahingehend an Transparenz, dass die Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheiten eingehend zu begründen und zu dokumentieren ist (W. Schwarz, 2020). Nach Schwarz reduziert das die Gefahr von Fehlinterpretationen. Der Leitfaden empfiehlt daher die in Abbildung 2.4 dargestellten Arbeitspakete.

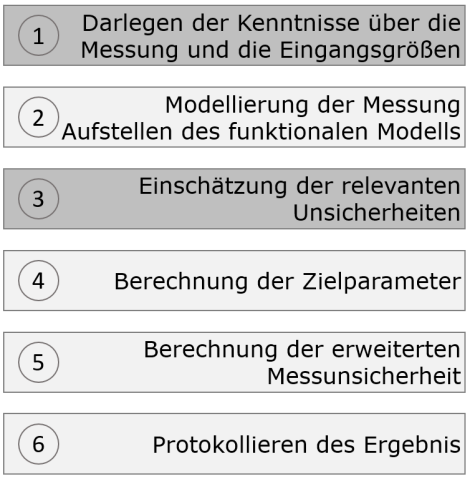


Abb. 2.4.: Arbeitsschritte zur Ermittlung von Messunsicherheiten nach dem GUM. Grafik auf Basis von Sommer und Siebert (2004) und W. Schwarz und Hennes (2017).

Diese Arbeit beinhaltet nicht die Durchführung und Auswertung von Überwachungsmessungen anhand dieses Schemas. Vielmehr geht es darum, ein grundlegendes Systemverständnis bei permanenten Installationen von Long Range Laserscannern zu erhalten und die Kenntnisse über die Messung mittels eines Long Range Laserscanners und die

entsprechenden Eingangsgrößen darzulegen (Abb. 2.4 – Schritt 1). Der weitere Verlauf dieser Arbeit konzentriert sich dabei auf wenige Eingangsgrößen (Kap. 2.5).

Zum anderen ist es ein zentrales Thema dieser Arbeit, ausgewählte systematische Unsicherheiten (Abb. 2.4 – Schritt 3) zu überprüfen und deren Quantität im praktischen Umfeld einzuschätzen. W. Schwarz und Hennes (2017) sowie Niemeier und Tengen (2020) beschreiben, dass die quantitative Ermittlung der Messunsicherheit in zwei Kategorien aufgeteilt werden kann. TYP A: Komponenten, die mit statistischen Methoden berechnet werden, und TYP B: Komponenten, die nicht aufgrund einer statistischen Analyse berechnet werden, sondern dass für den richtigen Umgang mit systematischen Messabweichungen messtechnische oder wissenschaftliche fundierte Kenntnisse und Erfahrungen über den Messprozess einfließen.

Im zweiten Teil dieses Kapitels erfolgt die Qualitätsbeurteilung und Qualitätssicherung in einem übergeordneten Kontext. Nach Heunecke et al. (2013) ist dies von besonderer Bedeutung, da derartige Messaufgaben zunehmend in größere, fachübergreifende Überwachungskonzepte eingebunden sind, und das zum Teil mit komplexen Auswertungen und Echtzeitanforderungen. Laufer (2011) fasst die Konzeption eines Qualitätsmodells von Wiltschko (2004) sowie dessen Weiterentwicklung in Wiltschko und Kaufmann (2005) zusammen. Dieses Modell bietet sich - unabhängig vom Kontext - an, die Qualität von Daten aus einer übergeordneten Sicht heraus zu verifizieren. Tabelle 2.2 fasst das Qualitätsmodell nach Wiltschko zusammen und wird nach Heunecke et al. (2013) und Laufer (2011) beschrieben.

Tab. 2.2.: Qualitätsmerkmale für Informationen aus Heunecke et al. (2013) nach Wiltschko (2004).

Zuverlässigkeitsmerkmale	
Verfügbarkeit	Daten/Informationen stehen zentral und aufbereitet zu einem definierten Zeitpunkt zur Verfügung.
Aktualität	Ausmaß der Übereinstimmung von Daten/Informationen mit der sich zeitlich ändernden konzeptionellen Realität.
Integritätsmerkmale	
Vollständigkeit	Das Vorhandensein aller relevanten Informationen zur Beschreibung der konzeptionellen Realität.
Konsistenz	Übereinstimmung der Informationen mit dem Informationsmodell.
Korrektheit	Übereinstimmung der Informationen mit der konzeptionellen Realität bei vorausgesetzter Aktualität.
Genauigkeitsmerkmale	
Metrisch	Abweichungen in den Messungen und deren Auswirkung auf die zu schätzenden Parameter.
Semantisch	Abstraktionsgrad bei der Modellierung der realen Welt.

Adaptiert auf die Integration eines geodätischen Monitorings wird ersichtlich, dass neben den klassischen Merkmalen wie Genauigkeit (hier metrische Genauigkeit) und Zuverlässigkeit (hier Korrektheit) weitere Qualitätsmerkmale von Bedeutung sind (Heunecke et al., 2013). Verfügbarkeit und Aktualität spielen eine übergeordnete Rolle bei den in dieser Arbeit forcierten permanenten Installationen auf Webbasis. Nach Heunecke et al. (2013) sind verfügbare, vollständige und konsistente Daten gegenüber der zu erreichenden Genauigkeit primär wichtig. Genau ist der Messwert erst, wenn er aktuell und korrekt ist. Die Autoren fassen zusammen, dass ein Messprogramm die Qualitätsanforderungen an eine ingenieurgeodätische Überwachungsmessung regeln und somit wesentlicher Bestandteil des Qualitätsmanagements sind. Ein klar strukturiertes und organisiertes Überwachungssystem schafft Vertrauen bei den Stakeholdern, verbessert und dokumentiert die Abläufe und entlastet ggf. im Haftungsfall. Die zuvor zusammengefassten wesentlichen Ziele an ein Qualitätsmanagement sind für die Bearbeitung dieser Arbeit essentiell und können als Leitfaden für die weitere Implementierung angesehen werden.

2.2.4. Relevante Normen, Richtlinien und Merkblätter beim Einsatz von permanentem Laserscanning

Dieses Kapitel fasst Normen, Richtlinien und Merkblätter zusammen, die beim Einsatz (permanenter) terrestrischer Laserscanner im Bereich der ingenieurgeodätischen Überwachungsmessung relevant sind. Für den Einsatz sind unterschiedliche Anwendungsbereiche denkbar, sodass Beispiele speziell aus dem Bergbau dargestellt werden. Auf Grundlage der verschiedenen Rahmenwerke wird der konzeptionelle Entwurf eines PLS-Echtzeitassistenzsystems begründet und im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellt. Eine Vollständigkeit wird nicht garantiert. Die hier geschilderten Betrachtungen sollen einen Überblick zu den Nachschlagewerken und den aktuellen Stand in der Literatur liefern.

Eine Daseinsberechtigung für Normen, Richtlinien und Merkblätter entsteht einerseits aus dem gesetzlichen Auftrag auf Bundes- und Landesebene. Heunecke et al. (2013) beschreiben, dass sich eine grundsätzliche Verpflichtung zu wiederkehrenden Überwachungsmessungen implizit aus den §§ 823 (Schadensersatzpflicht) und 836 (Haftung des Grundstücksbesitzers) des BGB ableitet. Dies bedeutet, dass der Eigentümer einer zu überwachenden Anlage das Risiko während des Betriebes trägt. Konkretere Regelungen dazu werden in den jeweiligen Landesbauordnungen beschrieben. Um der im Verkehr erforderlichen Sorgfaltspflicht nachzukommen (§ 276 BGB), das heißt, den Ausschluss der Fahrlässigkeit zu gewährleisten, sind anerkannte Regeln der Technik anzuwenden (Heunecke et al., 2013). Aus dem Bereich des Bergbaus entstehen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ebenfalls Verpflichtungen zur Durchführung von Überwachungsmessungen. Das Bundesberggesetz (BbergG) bestimmt in §125, auf Verlangen und unter Aufsicht der zuständigen Behörde Messungen durchführen zu lassen, die zur Erleichterung der Feststellung von Art und Umfang zu erwartender und zur Beobachtung eingetretener Einwirkungen des Bergbaus auf die Oberfläche erforderlich sind. Diese gesetzliche Bestimmung wird in weiteren Verordnungen konkretisiert. In der Allgemeinen Bundesbergverordnung (ABBergV) ist u.a. in §2 definiert, dass eine Gefährdung der eigenen Sicherheit und Gesundheit von Beschäftigen einer Arbeitsstätte auszuschließen ist. Bei solchen Maßnahmen ist der Stand der Technik zu berücksichti-

gen. In den §§3 (Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument), 11 (Spezifische Schutzmaßnahmen) oder 14 (Arbeitsstätten zur übertägigen Aufsuchung, Gewinnung und Aufbereitung, Wiedernutzbarmachung) sind weitere Vorgaben enthalten. Auf Landesebene in Nordrhein-Westfalen werden in der Bergverordnung für Braunkohlenbergwerke (BVOBr) in §37 ebenfalls Hinweise zur Verpflichtung einer Durchführung von Überwachungsmessungen gegeben, in dem für den Tagebaubetrieb vorgegeben wird, dass Verformungen von Randböschungssystemen überwacht werden müssen. Die Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche (Markscheider-Bergverordnung - MarkschBergV) auf Bundesebene wird in den §§2 (Grundsätze für Arbeiten nach § 1 Nummer 1) und 15 (Anforderungen an Messungen von bergbaubedingten Bodenbewegungen) konkreter. Nach §2 Absatz 1 MarkschBergV sind Arbeiten nach den allgemein anerkannten Regeln der Markscheide- oder Vermessungskunde unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten durchzuführen. Die Regeln der DIN 21901:1984-02 und die in deren Rahmen vom Deutschen Institut für Normung (DIN) aufgestellten technischen Normen sind grundsätzlich zu beachten. Eintragungen, die von den technischen Normen abweichen oder in ihnen nicht festgelegt sind, müssen an geeigneter Stelle kenntlich gemacht werden. Sie müssen begründet und dokumentiert werden. §2 Absatz 2 MarkschBergV wird konkreter, und es wird darauf verwiesen, dass Instrumente und Geräte für die zu erledigenden Arbeiten geeignet sein müssen.

Ein Handeln zur Durchführung von ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen lässt sich aus den allgemeinen, aber auch bergbaubezogenen Gesetzen und Verordnungen ableiten. Für die konkrete Durchführung wird beispielsweise auf anerkannte Regeln der Technik oder allgemein anerkannte Regeln der Vermessungskunde verwiesen. Eine Legaldefinition für diese Phrase gibt es in Deutschland nicht. Eine Beschreibung nach Leuschner (2019) (*«Anerkannte technische Regeln sind diejenigen Prinzipien und Lösungen, die in der Praxis erprobt und bewährt sind und sich bei der Mehrheit der Praktiker durchgesetzt haben.»*) zeigt, dass eine technische Regel in der Wissenschaft als theoretisch richtig gelten muss und damit also stets eine Anerkennung in Theorie und Praxis erforderlich ist. Die Normen des Deutschen Normenwerkes erfüllen die zuvor genannten Kriterien (DIN 820-1:2014-06, 2014). Aus dem Bereich der Ingenieurvermessung sind die Normen DIN 18709 Teil 1 bis 6 (Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie) oder ISO 17123 Teil 1 bis 9 (Feldprüfverfahren geodätischer Instrumente) zu nennen, wobei die DIN 18710-4 (Ingenieurvermessung – Teil 4: Überwachung) übersichtlich darstellt, wie eine Aufgabenbeschreibung und ein Messprogramm für eine geodätische Überwachungsmessung aufzubauen sind. Aus dem Bereich der Geotechnik ist die Normenreihe ISO 18674 Teil 1 bis 5 (Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geotechnische Messungen) zu nennen, die ähnlich zu den Betrachtungen einer ingenieurgeodätischen Überwachungsmessung aufgebaut ist, jedoch konkret einsetzbare Messtechnik auflistet. Die DIN-Normen 21901 bis 21921 (Bergmännisches Rißwerk) schließen die Sammlung an gängigen Normen in diesem Kapitel ab und enthalten zusätzliche Anmerkungen speziell für den Bergbau.

Nach Heunecke et al. (2013) sind die zuvor genannten Normen zur konkreten praktischen Durchführung sowie der Auswertung von Überwachungsmessungen wenig aussagekräftig. Die Autoren beschreiben allerdings auch, dass dies nicht erwartet werden darf, da jedes Bauwerk und dessen Überwachung ein individuell angepasstes Messprogramm verlangen. Neumann und Alkhatib (2019) fassen zusammen, dass es sich bei Normen grundsätzlich um «private Regelwerke mit Empfehlungscharakter» handelt.

Sie können als solche hinter dem Stand der Technik zurückbleiben, haben aber die Vermutung, für sich den Stand der Technik abzubilden. Dem gegenüber dienen nach Neumann und Alkhatib (2019) Merkblätter als Hilfestellung zur Umsetzung der anerkannten Regeln der Technik. Sie werden meist von Berufsverbänden ergänzend zu den Normen ausgegeben. Merkblätter sind so anzulegen, dass eine möglichst große Akzeptanz erlangt wird. Es ist daher kein hundertprozentiger Konsens notwendig (Neumann & Alkhatib, 2019). Aus diesem Grund kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass es sich bei Merkblättern immer um den anerkannten aktuellen Stand der Technik handelt. Vielmehr soll den Anwendern ein Leitfaden in Form von Best-Practice-Beispielen an die Hand gegeben werden.

Im Bereich der geodätischen Überwachungsmessung, mit Fokus auf das Laserscanning, sind aktuell zwei Veröffentlichungen relevant. 2021 wurden die Empfehlungen des Arbeitskreises «Geomesstechnik» der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) und der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. (DVW) herausgegeben. Die Empfehlungen dienen als Leitfaden, der alle wesentlichen Aspekte der Geomesstechnik nach dem aktuellen Stand der Technik im Detail behandelt (DGGT & DVW, 2022). Die Autoren beschreiben, dass die Aspekte auf gesicherten Erkenntnissen beruhen, die einen empirischen Nachweis einschließen. Außerdem wird angeführt, dass die Empfehlungen sich als «anerkannte Regeln der Technik» einführen sollen, durch deren Anwenden sich aber niemand der Verantwortung des eigenen Handelns entziehen darf. Der Laserscanner wird innerhalb der Empfehlungen konkret als Messinstrument für Überwachungsmessungen dargestellt, wobei eine Empfehlung zur Anwendung im permanenten Einsatz an dieser Stelle ausbleibt.

Für den DMV (Deutscher Markscheider-Verein e.V.) hat die Arbeitsgruppe «Laserscanning» 2008 ein Merkblatt über die «Grundsätze zum Einsatz von luftgestützten und terrestrischen Laserscanneraufnahmen im Bergbau» veröffentlicht (DMV, 2009). Die Autoren dieses Merkblattes beschreiben u.a. die Anwendung von Laserscannermessungen für gesetzlich und behördlich vorgeschriebene markscheiderische Aufgaben nach § 125 BbergG.

Im Bereich der Gesetze, Normen und Merkblätter gibt es einige Hinweise auf die Anwendung von Überwachungsmessungen in verschiedenen Kontexten. Im Zusammenhang dieser Arbeit wird erst auf Ebene der Merkblätter die Anwendung des Laserscannings diskutiert und anhand von Beispielen präsentiert. Neben der Rechtssicherheit sollen Normen, Richtlinien und Merkblätter das Handeln und die Verständigung zwischen den Beteiligten sinnvoll erleichtern. Das alltägliche Aufgabenfeld soll einfacher und systematischer gestaltet werden und vor allem Transparenz und Reproduzierbarkeit von Handlungen und Ergebnissen sicherstellen (Neumann & Alkhatib, 2019).

2.3. Terrestrisches Laserscanning

Nach Gordon (2008) sind terrestrische 3D-Laserscanner komplexe Messsysteme, die berührungslos Messobjekte dreidimensional abtasten und somit deren Dimension und Gestalt erfassen. Die Hardware ist heutzutage nicht mehr nur für die Datenaufnahme optimiert. Laserscanner sind zu Multisensorsystemen gereift, die neben zusätzlicher Sensorik wie bspw. GNSS, Neigungs- und Beschleunigungssensorik auch zusätzliche Rechenleistung mitbringen, sodass softwaretechnisch viele Prozessierungsschritte bereits online im Feld erledigt werden können. Das Aufgabenspektrum zum Einsatz von

TLS wird demnach ständig erweitert und das permanente Laserscanning (PLS) ist als eine neu herangewachsene Subdisziplin zu verstehen (Kap. 2.4). Abgrenzend zum PLS beschäftigt sich dieses Kapitel mit der grundlegenden Funktionsweise von TLS.

Das TLS basiert auf dem Messprinzip eines Tachymeters und kann den Polarmessinstrumenten zugeordnet werden (Kuhlmann & Holst, 2017). Dreidimensionale Koordinaten gemessener Punkte werden durch die zeitsynchrone Erfassung einer Strecke s_i und zweier Raumwinkel φ und ϑ berechnet (Abb. 2.5). Der Scanner wird dazu meist nahezu horizontal aufgestellt (Friedli, 2020). Zur Vereinfachung wird daher φ als *horizontale Richtung* und ϑ als *Zenitabstand* bezeichnet. Abgrenzend zur Tachymetrie ist der horizontale Aufbau des Instruments nicht zwingend. Mit Hilfe der Gleichungen 2.1 bis 2.3 werden aus den Polarkoordinaten die kartesischen Koordinaten *X, Y und Z* berechnet. Das Koordinatentripel beschreibt einen Punkt P_i in einem lokalen Koordinatensystem des Scanners (SOCS). Wobei die *Y-Achse* hierbei die Nullrichtung und die *Z-Achse* die vertikale Richtung entsprechend der hier getroffenen vereinfachten Annahme beschreibt. Es handelt sich im Gegensatz zu den Grundsätzen in der Geodäsie um ein mathematisches Rechtssystem, welches üblicherweise bei Laserscannern angewendet wird (Gordon, 2008).

$$X_i^{\mathrm{SOCS}} = s_i^{\mathrm{SOCS}} * \cos\varphi_i^{\mathrm{SOCS}} * \sin\vartheta_i^{\mathrm{SOCS}} \tag{2.1}$$

$$Y_i^{\mathrm{SOCS}} = s_i^{\mathrm{SOCS}} * \sin\varphi_i^{\mathrm{SOCS}} * \sin\vartheta_i^{\mathrm{SOCS}} \tag{2.2}$$

$$Z_i^{\mathrm{SOCS}} = s_i^{\mathrm{SOCS}} * \cos\vartheta_i^{\mathrm{SOCS}} \tag{2.3}$$

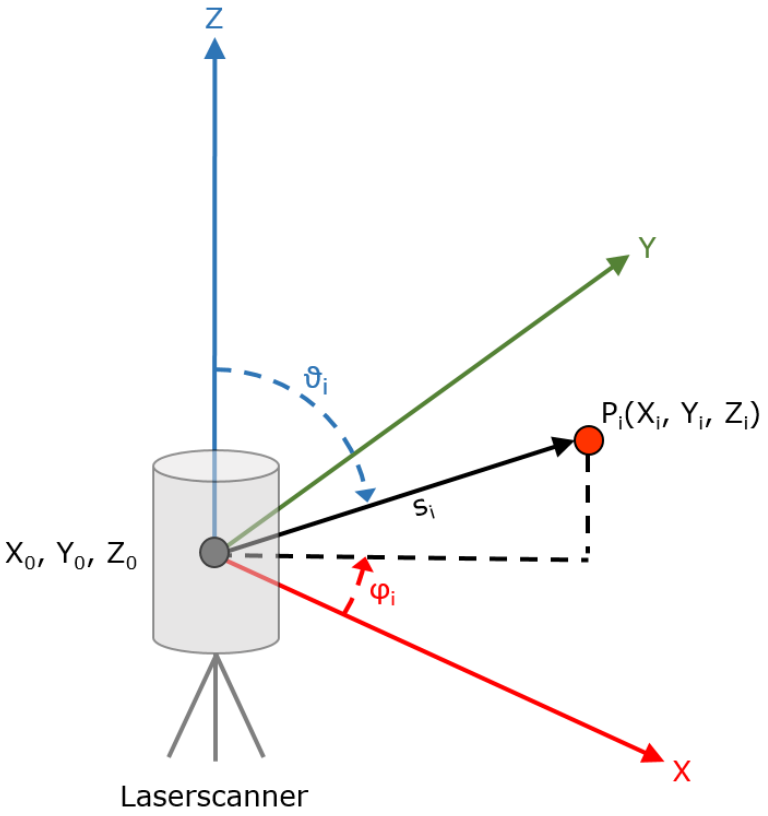


Abb. 2.5.: Koordinatensystem des TLS ausgedrückt im SOCS. Darstellung eines Punktes P_i in polaren und kartesischen Koordinaten.

Im Folgenden werden die Funktionsweise und das Messprinzip eines TLS mit dem Fokus auf Long Range Laserscannern beschrieben. Diese Systeme sind prädestiniert für den Einsatz bei großräumigen Monitoringanwendungen, bei denen Reichweiten von 500 bis 6.000 m erreicht werden. Die Detailierungstiefe dieses Kapitels geht über ein notwendiges Grundverständnis entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit nicht hinaus. Unter anderem in Kern (2003), Rietdorf (2005), Eling (2009), Gordon (2008), Vosselman und Maas (2010), Soudarissanane (2016), Wujanz (2016) oder Kuhlmann und Holst (2017) sind ausführliche Beschreibungen zum terrestrischen Laserscanning mit dem Fokus auf geodätische Anwendungen zu finden. Auf Grundlage des zuvor beschriebenen Messprinzips werden sogenannte Punktwolken generiert, indem der Laserstrahl in diskreten Winkelintervallen um eine primäre Y- und sekundäre Z-Drehachse abgelenkt wird (Gordon, 2008). Die Strahlablenkung erfolgt physisch durch die Anordnung von hochfrequent rotierenden Spiegeln. Es können verschiedene Prinzipien der Strahlablenkung unterschieden werden, die wiederum das Sichtfeld des Laserscanners vorgeben. Eine Zusammenfassung ist bei Kuhlmann und Holst (2017) nachzulesen. Bei der Anwendung von Long Range Laserscanning ist insbesondere das Verfahren der Streckenmessung relevant. Wujanz (2016) beschreibt, dass die Messmethodik eines TLS im Wesentlichen auf der reflektorlosen Distanzmessung beruht und somit als Schlüsselkomponente anzusehen ist. Soudarissanane definiert einen TLS als «Light Detection And Ranging (LiDAR) System» (Soudarissanane, 2016). Bei der Streckenmessung wird grundsätzlich zwischen zwei Arten der Lasermodulation unterschieden. Zum einen die Messung mittels einer kontinuierlich modulierten Welle, bei der die Strecke anhand der Phasenverschiebung zwischen gesendetem und empfangenem Lasersignal bestimmt wird und zum anderen das Impulsmessverfahren, bei dem ein modulierter Impuls ausgesendet wird und die Laufzeit des Signals, bis es in der Empfangseinheit des Scanners wieder eintrifft, gemessen wird (Jutzi & Stilla, 2003; Soudarissanane, 2016; Wujanz, 2016). Nach Gordon (2008) eignet sich das Impulsmessverfahren besonders für große Messentfernungen, was durch Jutzi und Stilla (2003) bestätigt wird, da der gepulste Laser mit einer höheren Leistungsdichte im Vergleich zur Phasenvergleichsmethode für diesen Anwendungsbereich von Vorteil ist. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt das Impulsmessverfahren und die darauf basierende Erweiterung des *Wave Form Digitising* bzw. *Full waveform data* erläutert.

Das Impulsmessverfahren beruht darauf, dass ein Laserimpuls von einem TLS emittiert, an einer Objektoberfläche reflektiert und von einer Photodiode in einer Empfangseinheit eines TLS als Echosignal detektiert wird (Abb. 2.6). Die Strecke zwischen TLS und dem gemessenen Punkt auf der Objektoberfläche wird abgeleitet, indem die Laufzeit des Laserimpulses gemessen wird. Deshalb ist dieses Verfahren mit dem in anderen Literaturangaben beschriebenen Time-of-flight Verfahren (TOF) synonym zu setzen. Die Zeit wird zwischen Ausgangs- und Eingangssignal gemessen, sodass sich die Strecke durch die Multiplikation mit 0,5 und der Lichtgeschwindigkeit bestimmen lässt.

$$D = \frac{c_o}{2n} \cdot t \tag{2.4}$$

Aus Gleichung 2.4 lässt sich die Distanz mit $c_0 = 299.792.458$ m/s *(Lichtgeschwindigkeit im Vakuum)* und *n (Brechzahl der Atmosphäre)* berechnen. Nach Joeckel et al. (2008) ist die Lichtgeschwindigkeit nur im Vakuum gültig und muss an die atmosphärischen Gegebenheiten angeglichen werden. Die Luft wird in der Atmosphäre als

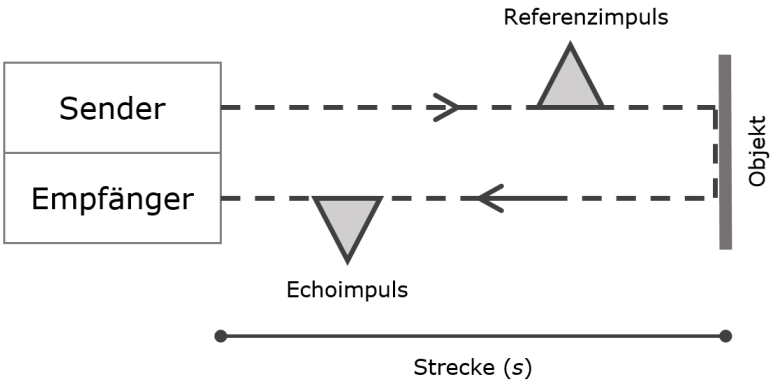


Abb. 2.6.: Grafische Darstellung des Impulslaufzeitverfahrens analog zur Gleichung 2.4.

Übertragungsmedium für den Laserstrahl genutzt. Es handelt sich um ein physikalisch dichteres Medium, sodass durch den Brechungsindex für die Atmosphäre die Laufzeit des Laserimpulses angepasst werden muss. Der Brechungsindex ist abhängig von der Trägerwellenlänge (Dispersion) sowie den meteorologischen Daten (Temperatur, Luftdruck und Partialdruck des Wasserdampfes) (Joeckel et al., 2008). Neben Einflüssen der Atmosphäre auf die Laufzeit einer Streckenmessung sind Einflüsse auf die geometrische Form der Bahnkurve (Vertikalrefraktion) relevant. Einflüsse der Atmosphäre werden im Allgemeinen in Kapitel 2.5.2 thematisiert.

Die Gleichung 2.4 als Grundlage für das Impulslaufzeitverfahren deutet darauf hin, dass die Zeit der kritische Parameter bei diesem Messverfahren ist. Zum einen ist die Messrate in Abhängigkeit von der zu messenden Strecke begrenzt. Soudarissanane (2016) zeigt anhand einer Strecke von 300 m, dass theoretisch 500.000 Punkte pro Sekunde messbar sind. Dies trifft jedoch nur zu, wenn das Messsystem entsprechend der zuvor genannten Kriterien ideal ist. Praktisch sind jedoch Zeitpuffer für die Signalverarbeitung am System notwendig. Deshalb liegt die effektive Messrate oftmals deutlich unterhalb der theoretischen Annahmen (RIEGL, 2022). Wujanz (2016) und Joeckel et al. (2008) beschreiben außerdem, dass hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Zeitmessung gestellt werden. Die Streckenauflösung ist direkt proportional zur Genauigkeit der Zeitmessung. Eine gewünschte Streckenauflösung von 0,005 m erfordert eine Zeitmessung mit einer Genauigkeit von 0,033 ns Joeckel et al. (2008).

Das Impulslaufzeitverfahren ist das Mittel der Wahl bei der Lasermessung über größere Distanzen. Durch die großen Reichweiten ergeben sich jedoch herausfordernde Messsituationen, bei denen die Objektziele nicht immer eindeutig sind. Beim Monitoring natürlicher Objekte in großen Reichweiten kann es dazu kommen, dass (zumindest zeitweise) Vegetation das Objekt in Teilen verdeckt. Ein ausgesendeter Laserstrahl (Referenzimpuls - Abb. 2.7) wird von multiplen Objekten reflektiert (O1 bis O4 - Abb. 2.7), sodass mehrere Echosignale entstehen (E1 bis E4 - Abb. 2.7). Sollen zudem die Grenzen an das TLS ausgereizt werden, sind zusätzliche Herausforderungen bei der Entwicklung, Herstellung und dem operativen Einsatz zu bewältigen (Ullrich & Pfennigbauer, 2011). Nach Ullrich und Pfennigbauer (2011) ist daher die Mehrzielauflösung eines Laserimpulses essentiell und als wesentliche Erweiterung des Messverfahrens zu sehen. Da ein Laserstrahl, der normalerweise auf eine Divergenz von weniger als 1 mrad kollimiert ist, nicht nur auf ein einziges Zielobjekt treffen kann, ist es aus Anwendersicht vorteilhaft, alle Reichweiten zu multiplen Zielen zu erhalten. Um mehrdeutige Ziele (T1 bis T4 - Abb. 2.7) detektieren zu können, wandelt ein Fotodetektor die optischen Echosignale in

elektrische Signale um. Ullrich und Pfennigbauer (2011) beschreiben, dass die Anwendung der Echodigitalisierung und einer Wellenformanalyse in kritischen Zielsituationen am sinnvollsten ist (Ullrich & Pfennigbauer, 2011). Die Wellenformanalyse erfolgt bei Systemen von RIEGL mittels «Full waveform data» (FWA) und wird schematisch in Abbildung 2.8 zusammengefasst. Die klassischen Waveform-Daten beinhalten die digitalisierten Echosignale und eine Kopie des ausgesendeten Pulses. Ist die Impulsform des Systems nahezu gaußförmig, liefert die Gauss' Dekomposition hervorragende Ergebnisse mit hoher Präzision und Genauigkeit. Die Waveform-Daten enthalten zusätzliche Informationen wie eine Zeitstempelung in UTC oder einen Scanwinkel. Mit einem geeigneten Sensormodell werden die durch FWA ermittelten Entfernungen und Merkmale anschließend in eine Punktwolke transformiert (Ullrich & Pfennigbauer, 2011).

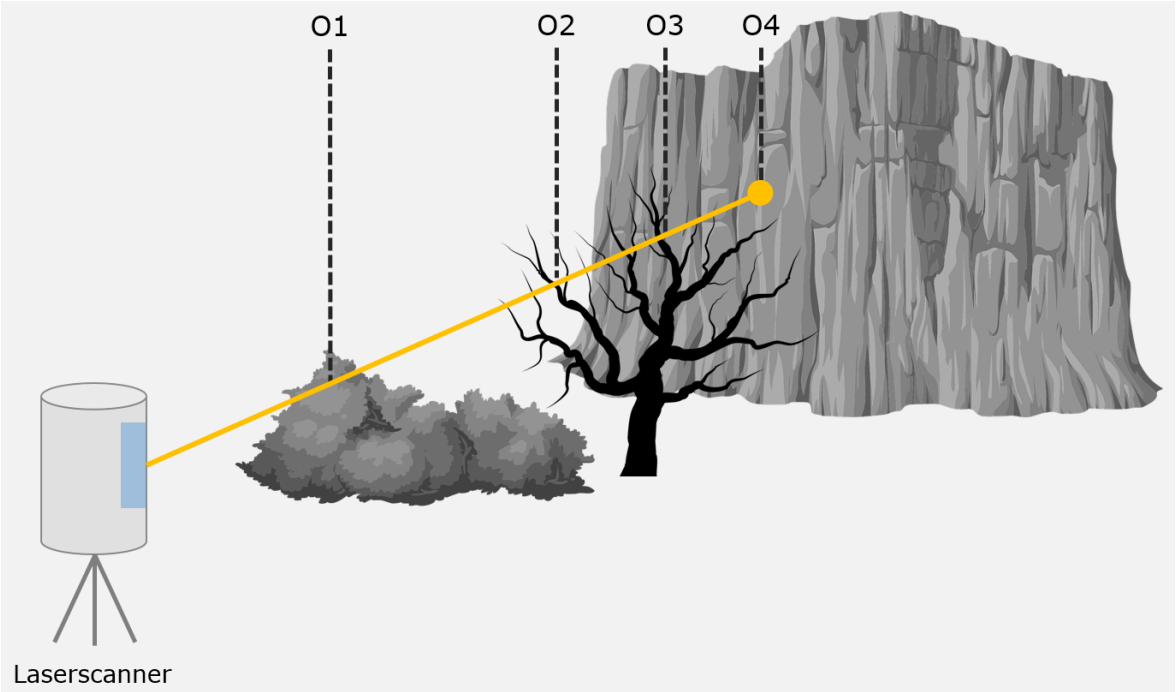


Abb. 2.7.: Grafische Darstellung der Interaktion eines ausgesendeten Messstrahls mit verschiedenen Objekten. Basierend auf Ullrich und Pfennigbauer (2011).

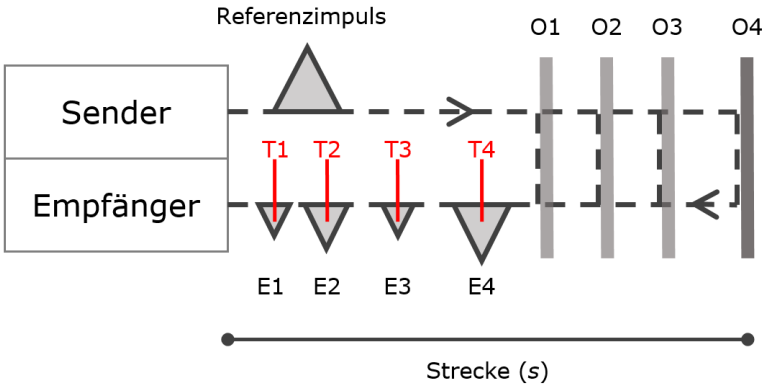


Abb. 2.8.: Schema der Wellenformanalyse mittels «Full waveform data». Basierend auf Ullrich und Pfennigbauer (2011).

2.4. Permanentes Laserscanning

Technologische Entwicklungen der letzten Jahre gehen beim TLS über den Messsensor an sich hinaus. TLS lassen sich permanent mit entsprechender Stromversorgung, einem Datenmanagementsystem sowie einer Datenkommunikation zu zentralen Servern an einem zu überwachenden Messobjekt installieren. Mit Hilfe offengestalteter Programmierschnittstellen lassen sich Messprogramme individuell an die jeweilige Messaufgabe adaptieren, sodass automatisiert Messungen ausgeführt werden können (Schröder et al., 2022).

Mittels PLS sind technisch die Voraussetzungen geschaffen, dass nahezu kontinuierlich 3D-Beobachtungen in (sub-)stündlichen bis täglichen Zeitintervallen erfasst werden können. Unterschiedliche Implementierungen über verschiedene Zeiträume von Monaten bis Jahren nehmen zu (Eitel et al., 2016). Mittels der umfangreichen Zeitreihen dreidimensionaler Szenen entsteht ein enormes Potential für geografische Analysen hinsichtlich geomorphologischer Veränderungsprozesse. Dem gegenüber stehen jedoch auch Herausforderungen bei der Detektion und Abgrenzung entsprechender Informationen zu den Oberflächenveränderungen (Anders et al., 2021). Anders et al. (2019) heben außerdem die Wichtigkeit einer hochfrequenten Messwerterfassung hervor. Die Autoren beschreiben, dass Oberflächenveränderungen nur vorübergehend stattfinden können und daher unentdeckt bleiben oder fehlinterpretiert werden können, wenn Messintervalle zu groß ausgewählt werden. Dies gilt vor allem an Überwachungsobjekten, bei denen die Prozesse nicht in einer dominanten und einheitlichen Richtung ablaufen (Anders et al., 2019).

Die Anzahl der Veröffentlichungen zu Anwendungen von PLS hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Entsprechende Systeme werden bspw. zur Beobachtung dynamischer Prozesse an Hängen, Felsstürzen, Gletschern, der Bodenerosion oder von Sandstränden eingesetzt. Als eine der ersten Anwendungen von PLS setzten Kromer et al. (2017) ein System zur Überwachung von Hangrutschungen mit halbstündlichen Messintervall über einen Zeitraum von sechs Wochen ein. Die daraus resultierende Zeitreihe enthielt wertvolle Informationen zum Deformationsverhalten des Hangs im Vorfeld sich ereignender Felsstürze. Williams et al. (2019) untersuchten anhand von stündlichen Messungen mittels PLS an einer Steilküste die Häufigkeitsverteilung von Felsstürzen. Informationen in dieser Zeitreihe lassen Rückschlüsse auf das Risikopotential zu. Mithilfe von PLS im Allgemeinen ist es möglich, Veränderungen an der Erdoberfläche zu erkennen, deren Zeitpunkt, Dauer oder Ausmaß im Voraus nicht bekannt war.

In der Tabelle 2.3 sind wesentliche Publikationen zusammengefasst und der Anwendungsfall ist kurz beschrieben. In den letzten fünf Jahren hat die Frequenz der Publikationen deutlich zugenommen. Die Arbeitsgruppen sind untereinander vernetzt und tauschen sich zu ihren Erkenntnissen aus (Kuschnerus et al., 2021c). Bei der Anwendung von PLS hat sich bisher kein grundlegender Workflow etabliert, wobei fundamentale Prozessierungsschritte bei allen Gruppen gleich sind. Dazu gehört beispielsweise die Registrierung der multitemporalen Scans untereinander oder die Diskussion von zeitabhängigen Artefakten in den jeweiligen Zeitreihen. In den jeweiligen Projekten fließt für die Messkonzeption das individuelle Wissen der jeweiligen Experten ein. Es mangelt noch an einem einheitlichen, transparenten Workflow, der für alle Beteiligten nachvollziehbar und reproduzierbar ist.

Tab. 2.3.: Publikationen betreffend multitemporaler Datenanalysen und permanenter Installationen terrestrischer Laserscanner - chronologisch sortiert.

Referenz	Anwendungsgebiet
Little (2006)	Überwachung von Tagebauböschungen (PPRust Bergwerk / Südafrika)
Adams et al. (2014)	Überwachung lawinengefährdeter Hänge (Alpe Rauz und Mohnenfluh / Österreich)
Canli et al. (2015)	Überwachung von Hangrutschungen Gresten / Österreich
Fowler und Geier (2015)	Überwachung von Tagebauböschungen (Tagebau Hambach / Deutschland)
Hartzell et al. (2015)	Studie zu Volumenänderungen von Schnee (Mammoth Mountain / USA)
Höfle et al. (2016)	Überwachung von Hangrutschungen (Gresten / Österreich)
Tschirschwitz et al. (2016)	Überwachung von Strömungsbauwerken (Hamburg / Deutschland)
Kromer et al. (2017)	Überwachung von Hangrutschungen (Séchilienne / Frankreich)
Vos et al. (2017) Vos et al. (2020) Vos et al. (2022)	Überwachung von Küstenveränderungen (Kijkduin / Niederlande)
Williams (2017) Williams et al. (2018) Williams et al. (2019)	Studie von Felsstürzen an Steilküsten (Whitby / Großbritannien)
O'Dea et al. (2019)	Überwachung von Küstenveränderungen (Duck / USA)
Campos et al. (2020)	Vegetationsüberwachung (Südfinnland)
Deruyter et al. (2020)	Überwachung von Küstenveränderungen (Mariakerke / Belgien)
Kuschnerus et al. (2021a) Kuschnerus et al. (2021b) Kuschnerus et al. (2022)	Überwachung von Küstenveränderungen (Noordwijk / Niederlande)
Voordendag et al. (2021) Voordendag et al. (2022)	Gletschermonitoring (Hintereisferner / Österreich)

2.5. Parameter einer permanenten Installation eines Long Range Laserscanners

Die Erwartungen an die Genauigkeit als auch an die Qualität von dreidimensionalen Punktwolken sind im Allgemeinen sehr hoch und grundsätzlich durch die methodische sowie hardwareseitige Evolution der letzten Jahre berechtigt. Jedoch sind bestmögliche Ergebnisse nur dann möglich, wenn die verschiedenen zufälligen und systematischen Abweichungen verstanden und in einem stochastischen Modell für das TLS dargestellt werden. Nach Soudarissanane et al. (2011) geben Hersteller oftmals technische Spezifikationen inklusive einer Genauigkeitsangabe an. Allerdings basieren diese Werte auf Messungen unter Laborbedingungen. Die Kennzahlen lassen sich nur bedingt in der Praxis anwenden, da die meisten Messszenarien eine Vielzahl unterschiedlicher Oberflächenmaterialien beinhalten, Teile der Szenen in verschiedenen Scangeometrien aufgenommen sind oder atmosphärische Bedingungen im Messgebiet nicht überwacht sind und zwischen einzelnen Scans teilweise erheblich variieren. Systematische und zufällige Fehler akkumulieren sich und wirken sich auf die Qualität der einzelnen Messpunkte aus. Darüber hinaus pflanzen sich die Abweichungen in den Einzelpunkten durch weitere Standardverarbeitungsschritte, wie zum Beispiel die Registrierung der Punktwolken, in ein entsprechendes Endprodukt fort (Soudarissanane et al., 2011). Zur Beschreibung des gesamten Fehlerhaushalts gibt es unterschiedliche Klassifizierungen. Lichti und Gordon (2004) unterscheiden interne und externe Fehlerquellen. Als interne Quellen werden zufällige Fehler bezeichnet, die direkt dem Laserscanner bzw. der Hardware zugeordnet werden können, und externe Quellen sind mit zufälligen Fehlern bei der Registrierung einzelner Scans und der Messkonfiguration zu beschreiben. Basierend auf dieser Zweiteilung haben Reshetyuk (2006, 2009), Soudarissanane (2016), Soudarissanane et al. (2011), Staiger (2005) und Zogg (2008) eine detailliertere Beschreibung der Fehlereinflüsse etabliert und unterscheiden grundsätzlich 4 Kategorien:

- Abweichungen durch die Hardware des TLS und die Scanmechanismen
- Atmosphärische und umweltbedingte Einflüsse
- Objekteigenschaften
- Metrologische Eigenschaften

Wobei festzuhalten ist, dass unter den metrologischen Eigenschaften Einflüsse der Scangeometrie und der Registrierung zusammengefasst sind, jedoch je nach Literaturquelle unterschiedlich definiert werden. Das Erfordernis an den Registrierungsprozess und damit verbunden an eine Georeferenzierung werden innerhalb dieser Dissertation gesondert behandelt (Kap. 2.5.1).

Eine detaillierte Zusammenfassung aller Fehlereinflüsse ist bei Reshetyuk (2006, 2009) nachzulesen. Des Weiteren sind folgende Literaturhinweise für Beschreibungen zu den jeweiligen Fehlereinflüssen zu empfehlen. Gordon (2008) geht im Detail auf die Einflussfaktoren der elektrooptischen Distanzmessung (Additionskorrektur, Maßstabskorrektur, Zyklische Phasenfehler, Phaseninhomogenitäten), Einflussfaktoren auf den äußeren Lichtweg des Messstrahls (Einfluss der Atmosphäre, «Kometenschweif», Auftreffwinkel des Messstrahls, «Schwarze Löcher», Einfluss der Oberflächenfarbe sowie der Oberflächenbeschaffenheit) und Einflüsse auf die räumliche Strahlablenkung

(Indexabweichung des Vertikalkreises, Achsenabweichungen und Exzentrizitäten) ein. In den Arbeiten von Friedli (2020), Friedli et al. (2019) und Wujanz et al. (2014a) wird die Thematik der atmosphärischen Refraktion, insbesondere beim Einsatz von Long Range Laserscannern, bearbeitet. Das Thema ist Kernelement dieser Arbeit und wird detailliert beschrieben (Kap. 2.5.2). Zum Scanner selbst, seiner Scanmechanismen und der Notwendigkeit von Kalibrierungen sind u.a. die Publikationen von Holst et al. (2016, 2018) und Medić (2021) zu beachten. Zámečníková et al. (2014) haben den Einfluss der Oberflächenreflexion auf die Entfernungsmessung eines terrestrischen Laserscanners untersucht. In Winiwarter et al. (2020) ist die Durchführung eines Experiments zur Untersuchung des Einflusses von Material, Reichweite und Einfallswinkel auf Intensität, Pulsform und vor allem auf die Unsicherheit der Entfernungsmessung beschrieben. Kersten et al. (2009) und Soudarissanane et al. (2007, 2011) thematisieren Einflüsse der Scangeometrie in Abhängigkeit der Einfallswinkel auf die Messunsicherheit der Strecke. Die Unsicherheit in der Streckenmessung in Abhängigkeit von der Oberflächenfarbe wird bei Clark und Robson (2004) sowie Mechelke et al. (2007) diskutiert. Pfeifer et al. (2007), Wujanz et al. (2017) und Wujanz et al. (2018c) setzen sich mit der Interaktion des emittierten Lasersignals mit der Objektoberfläche auseinander und bauen unter anderem auf dieser Kenntnis stochastische Modelle auf Grundlage dieser Intensitätswerte auf. Die Interaktion von Laserstrahl und Oberfläche ist auch Inhalt der Dissertation von Schäfer (2017). Kauker und Schwieger (2017), Kerekes und Schwieger (2020), Raschhofer et al. (2021) und Vos et al. (2020) zeigen anwendungsbezogene Ansätze, die zuvor genannten Fehlereinflüsse zu beschreiben oder innerhalb von Varianz-Kovarianz-Matrizen zu quantifizieren.

Die bisherigen Ausführungen beschreiben den Fehlerhaushalt des TLS im Allgemeinen mit Fokus auf den Nahbereich und Erfahrungen aus den verschiedenen Anwendungen. In dieser Arbeit soll der Fehlerhaushalt mit dem Fokus auf PLS im Long Range Bereich berücksichtigt werden. Klassische Ausgleichungsaufgaben in der Geodäsie ergeben sich daraus, dass zur eindeutigen Bestimmung von unbekannten Parametern mehr Messungen ausgeführt werden als notwendig. Es liegt eine Überbestimmung vor (Benning, 2011). Bei der Überwachungsmessung mittels PLS liegt keine Überbestimmung in der Weise vor, dass sich die Messungen gegenseitig kontrollieren. Messfehler fließen direkt in das Endergebnis ein und können durch herkömmliche Methoden der Statistik nicht aufgedeckt werden. Mittels PLS und der Anwendung von Long Range Laserscannern bleiben bisherige Herausforderungen einer punktwolkenbasierten Deformationsanalyse bestehen oder neue Herausforderungen kommen hinzu. Entsprechend des Kapitels 2.2.3 (Stichwort: GUM) sind sinnvolle Signifikanzniveaus per Fehlerfortpflanzung oder aus Erfahrungswerten abzuleiten. Bei den vielseitigen Einsätzen von PLS in unterschiedlichen Szenarien (Kap. 2.4), konnten bereits Erkenntnisse zum Systemverhalten hinsichtlich fehlerhafter Einflussgrößen gewonnen werden. Innerhalb dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf der Registrierung und Georeferenzierung, den atmosphärischen Einflüssen sowie der Informationsextraktion. Nach Gojcic et al. (2020) ist die Parametrisierung besonders herausfordernd, wenn es um das Monitoring in natürlichen Umgebungen geht.

2.5.1. Registrierung und Georeferenzierung

Bei der Aufnahme von Punktwolken mittels TLS entstehen Messdaten in einem dreidimensionalen lokalen Koordinatensystem (SOCS). Das lokale Koordinatensystem bezieht sich dabei auf den jeweiligen Standpunkt des Scanners (Kap. 2.3, Abb. 2.5). Wenn beispielsweise große, komplexe Objekte aufgenommen werden, ist es notwendig, mehrere Scanpositionen zu verwenden, damit die relevante Geometrie vollständig erfasst wird. Es entstehen individuelle SOCS, die es in ein einheitliches übergeordnetes Koordinatensystem, ein projektbezogenes Koordinatensystem (PRCS – Project Coordinate System), zu transformieren gilt (Friedli, 2020).

Analog ist die Vorgehensweise bei der Anwendung von PLS. Typischerweise ist davon auszugehen, dass bei Monitoringanwendungen ein einzelner Standpunkt ausreicht (Friedli, 2020). Multitemporale Scans sind in einen gemeinsamen Referenzrahmen zu transformieren (Friedli & Wieser, 2016). Nach Wujanz et al. (2018a) basieren die Methoden zur Analyse zeitvariabler Veränderungen zwischen multitemporalen Scans auf der Annahme, dass individuelle Scans zu einzelnen Messepochen in einem gemeinsamen stabilen Referenzrahmen vorliegen. Die Autoren beschreiben diesen Schritt in der Prozessierungskette als essentiell und besonders sensibel. Auftretende negative Effekte in diesem Prozessschritt haben einen unmittelbaren und systematischen Einfluss auf die Quantifizierung der Deformationswerte. Folglich werden sämtliche Schlussfolgerungen, die aus den ermittelten Resultaten gezogen werden, verfälscht (Wujanz et al., 2018a).

Die Verknüpfung von Einzelscans verschiedener Standpunkte oder Epochen wird Registrierung (Abb. 2.9 - R) genannt (Kuhlmann & Holst, 2017) und besteht nach Vosselman und Maas (2010) in der Regel aus zwei Schritten. Zum einen werden die Transformationsparameter geschätzt, und zum anderen müssen die Transformationsparameter auf die gesamte Punktwolke angewendet werden. Die Transformation geschieht in der Regel durch eine 7-Parameter-Helmert-Transformation.

$$X_j = X_0 + \mu \cdot R\left(\varepsilon_z\right) \cdot R\left(\varepsilon_Y\right) \cdot R\left(\varepsilon_X\right) \cdot x_j \tag{2.5}$$

Nach Kuhlmann und Holst (2017) beschreibt X_0 die Translation, $R\left(\varepsilon_z\right)$, $R\left(\varepsilon_Y\right)$ und $R\left(\varepsilon_X\right)$ die Rotationen um drei Winkel der jeweiligen Koordinatenachsen und μ den Maßstab, um Koordinaten von einem lokalen bzw. Ausgangssystem x_j in ein übergeordnetes bzw. Zielsystem X_j zu transformieren. Anwendungsbezogen wird diskutiert, ob der Maßstabsfaktor zu schätzen oder vernachlässigbar ist. Beispielweise Kuhlmann und Holst (2017), Lichti und Gordon (2004), Reshetyuk (2006) und Scaioni (2012) geben an, dass bei der Messung mittels identischer Laserscanner der Maßstab $\mu = 1$ angenommen werden kann. Eine Parameterschätzung des Maßstabs kann je nach Anwendung der Qualitätssicherung eines funktionalen Deformationsmodells dienen, da unzureichend modellierte Effekte, wie die der Atmosphäre auf die Lasermessung, sich in einer Schätzung als signifikant darstellen können. Bei bestimmten Aufgabenstellungen ist in einem weiteren Schritt die Georeferenzierung und damit verbunden eine absolute Koordinierung im globalen Kontext (GLCS – Global Coordinate System) notwendig. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn Geomonitoring mittels eines multisensoralen Netzwerks durchgeführt wird und Messdaten aus unterschiedlichen Datenquellen gemeinsam analysiert werden sollen. Die Besonderheit der Georeferenzierung besteht darin, dass der gemeinsame Koordinatenrahmen durch ein globales Referenzkoordina-

tensystem gebildet wird, das durch unabhängige geodätische Messungen (bspw. GNSS oder Tachymetrie) ermittelt oder zusätzlicher, in modernen Laserscanner integrierter Sensorik (z. B. GNSS-, Neigungs- oder inertiale Sensorik), realisiert wird (Wujanz et al., 2019). Die Registrierung dagegen arbeitet ausschließlich mit den erfassten Daten selbst (Wujanz et al., 2019). Mathematisch gleicht die Georeferenzierung der Registrierung. Abbildung 2.9 fasst die zuvor beschriebenen Relationen zusammen. Innerhalb eines multitemporalen Scanningprojektes entsteht zu jeder Messung ein SOCS, das in ein projektbezogenes System transformiert (Abb. 2.9 - R) wird. Es wird angenommen, dass das PRCS über die komplette Projektlaufzeit einen stabilen Referenzrahmen darstellt. Das PRCS kann beispielsweise mit dem SOCS der Nullepoche identisch oder über idente Punkte im Objektraum definiert sein. Projektbezogen, jedoch nicht zwingend, kann eine Georeferenzierung (Abb. 2.9 - GEO) in einem weiteren Schritt notwendig werden.

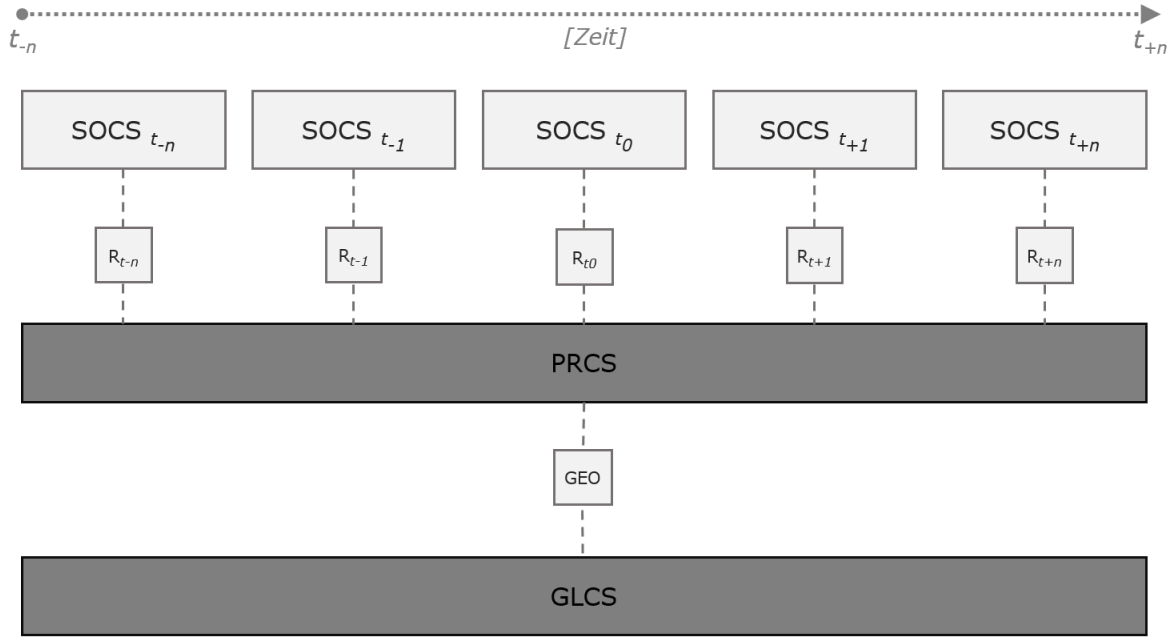


Abb. 2.9.: Schema zur Registrierung und Georeferenzierung multitemporaler Punktwolken.

Für die Registrierung bzw. Georeferenzierung einzelner Punktwolken lassen sich verschiedene Verfahren anwenden. Die Verfahren lassen sich grundlegend in drei Kategorien unterteilen und werden nach Lösungen mittels Zielzeichen, Software oder der Hardware selbst klassifiziert. Im Folgenden werden die jeweiligen Kategorien beschrieben und abschließend deren Adaption für die Anwendung im Geomonitoring diskutiert.

2.5.1.1. Zielzeichenbasierte Registrierung und Georeferenzierung

Eine etablierte Methode zur Verknüpfung multipler Punktwolken basiert auf der Nutzung von signalisierten Zielzeichen (Chow et al., 2010). Nach Wujanz et al. (2019) eignen sich für die Signalisierung der Zielzeichen kugelförmige, zylindrische oder ebene Ziele. Bei den ebenen Zielen haben sich je nach Hersteller Black-White-Targets oder retroreflektierende Marker etabliert. Der Vorteil dieser Methodik liegt in der hohen Zuverlässigkeit und Genauigkeit durch die beeinflussbare Konfiguration der Zielzeichen (Kuhlmann & Holst, 2017). Konzept und Anwendung sind meist aus der Nutzung

konventioneller Messtechnik wie dem Tachymeter bekannt und lassen sich einfach anpassen. Des Weiteren lässt sich das Verfahren unmittelbar in eine Georeferenzierung integrieren, wenn für die Zielzeichen Koordinaten in einem übergeordneten Referenznetz vorhanden sind. In Barbarella et al. (2015), Bitelli et al. (2004) und Prokop und Panholzer (2009) wird das Vorgehen anwendungsbezogen mittels GNSS oder Totalstation vorgestellt. Dem gegenüber beschreiben Kuhlmann und Holst (2017), Paffenholz (2012) und Wujanz et al. (2019) auch diverse Nachteile wie den Aufwand für die Verteilung der Ziele im betreffenden Bereich, die limitierte Ausnutzung der inhärenten Redundanz innerhalb der überlappenden Scanareale und bei der Option der Georeferenzierung die erforderliche Vermessung der Ziele im Referenzsystem, um nur die wesentlichen Kritikpunkte darzustellen.

2.5.1.2. Softwarebasierte Registrierung und Georeferenzierung

Neben der softwarebasierten Registrierung wird oftmals auch der Begriff der oberflächenbasierten oder datenbasierten Registrierung verwendet. Beide sind in diesem Kontext synonym verwendbar. Im Gegensatz zum zielzeichenbasierten Vorgehen werden Korrespondenzen zur Ermittlung der Transformationsparameter nicht künstlich in die Punktwolken integriert, sondern direkt aus den Überlappungsbereichen der Punktwolken selbst gewonnen (Kuhlmann & Holst, 2017). Nach Kuhlmann und Holst (2017) liegt zusätzlich eine Georeferenzierung vor, wenn die im Scan abgetasteten Objekte bereits in einem übergeordneten Koordinatensystem vorliegen. Nach Friedli (2020) basieren softwarebasierte Registrierungsmethoden typischerweise auf dem Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus von Besl und McKay (1992) und Chen und Medioni (1991). Gruen und Akca (2005) und Rusinkiewicz und Levoy (2001) fassen Varianten und Weiterentwicklungen des Algorithmus zusammen und geben eine Übersicht. Nach Wujanz et al. (2019) ist ein wesentlicher Vorteil dieser Strategie die tatsächliche Nutzung der redundanten Informationen innerhalb einer Punktwolke. Ein Nachteil ist ihre Abhängigkeit von einer ausreichenden Vororientierung zweier Datensätze, was eine essentielle Voraussetzung für konvergierende Resultate der Parameterschätzung mittels ICP ist. Die Vororientierung kann nach Friedli (2020), Friedli und Wieser (2016) und Wujanz et al. (2019) entweder manuell, mittels zusätzlicher in den TLS integrierter Messtechnik oder automatisch erfolgen. Automatisierte Methoden werden durch Aiger et al. (2008) und Theiler et al. (2014) vorgeschlagen. Neben dem sich auf Punkte beziehenden ICP Algorithmus finden Methoden Anwendung, die sich auf Objektkorrespondenzen bzw. geometrische Primitive beziehen. Wujanz et al. (2018b) beschreibt Registrierungsverfahren multipler Punktwolken mittels Ebenen und fasst entsprechende Literatur zusammen, die die Entwicklungen in den letzten beiden Dekaden beschreibt. Die ersten Versuche und Entwicklungen zur ebenenbasierten Registrierung hatten unterschiedliche Motivationen und können bei Bosché (2012), Dold und Brenner (2006), Förstner und Khoshelham (2017), Gielsdorf et al. (2008), Previtali et al. (2014), Rietdorf (2005), Rietdorf et al. (2004), Vosselman et al. (2004) und Wujanz (2012) nachvollzogen werden. Die Firma RIEGL hat die Registrierung unter Einbeziehung der gescannten Oberfläche 2012 vorgestellt (Gaisecker et al., 2012). Das RIEGL Software-Modul Multi Station Adjustment (MSA) verwendet hierfür einen modifizierten ICP und beruht auf der Auswertung korrespondierender Flächen. Eine Weiterentwicklung dieser Lösung nutzt neben der reinen Geometrie auch die kalibrierten Messwerte des Reflexionsgrades im Spektralbereich (Studnicka & Effkemann, 2019; Ullrich & Fürst, 2017).

2.5.1.3. Hardwarebasierte Registrierung und Georeferenzierung

Unter dieser Art der Registrierung wird die Ausnutzung von externer Sensorik wie GNSS, Neigungssensorik, Kompass oder auch Tachymetrie zur Bestimmung der Transformationsparameter verstanden (Kuhlmann & Holst, 2017). Je nach Integrationsgrad der externen Sensorik handelt es sich um eine Teilregistrierung und dann direkt auch eine (teilweise) Georeferenzierung (Kuhlmann & Holst, 2017). Paffenholz (2012), Paffenholz et al. (2010a, 2010b) und Wilkinson et al. (2010) beschreiben eine vollständig hardwarebasierte Georeferenzierung eines TLS. Der Fokus dieser Arbeit liegt nicht auf hardwarebasierten Methoden.

2.5.1.4. Registrierung und Georeferenzierung im Konzext von Geomonitoring und Deformationsanalyse

Bei ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen mittels PLS darf nicht angenommen werden, dass die genutzten Messpfeiler stabil sind (Frukacz et al., 2017) und über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg Punktwolken von exakt demselben Gerätestandort erfasst werden und daher keine weitere Registrierung der multitemporalen Daten notwendig ist. Im Gegensatz zur Verwendung moderner Totalstationen, die über eine interne Neigungskompensation verfügen, sind PLS nicht automatisch horizontiert, sodass davon auszugehen ist, dass sich Pfeilerbewegungen direkt auf die Messergebnisse auswirken und die Gefahr von Fehlinterpretationen erhöht ist. Die hier vorgestellten Verfahren eignen sich auf unterschiedlichen Skalen für die Anwendung innerhalb eines Geomonitorings unter geodätischen Gesichtspunkten. Ausgehend von den zielzeichenbasierten Verfahren weisen Friedli und Wieser (2016) und Wujanz et al. (2018a) auf diverse Nachteile hin. Der Aufwand zur Installation von Zielzeichen kann unverhältnismäßig oder sogar unmöglich sein, da Bereiche unzugänglich sind oder das Betreten nur mit großen Risiken für das Personal möglich ist. Zur Gewährleistung der Stabilität der Zielzeichen kann es unter Umständen notwendig sein, eine feste Gründung zu verwenden (Friedli & Wieser, 2016). Durch diese Restriktionen kann nach Wujanz et al. (2018a) ein geodätischer Grundsatz gefährdet werden, da durch mangelnde Verteilungsgeometrie der Passpunkte Extrapolationseffekte auftreten und die Ergebnisse verfälschen. Außerdem geben beide Autoren an, dass bei Anwendungen von Scannern im Long Range Bereich die Zielzeichen proportional größer werden müssen. Bei solchen Entfernungen können Kugeln und andere künstliche Ziele von überschaubarer Größe zu klein im Verhältnis zum Footprint und Winkelschrittweite des Scanners sein (Friedli & Wieser, 2016). Zielzeichen mit großen Flächen, wie beispielsweise bei Geier und Martienßen (2017) eingesetzt, sind für langzeitliche Installationen unpraktikabel und für geodätische Zwecke mit höchsten Genauigkeitsansprüchen ungeeignet. Die Entwicklung hin zur Integration von Glasprismen (bspw. LEICA GPR1) in den Messprozess eines Long Range Laserscanners durch die Firma RIEGL wirkt der Größenproblematik entgegen. Die neue Methode wird in dieser Arbeit beschrieben, evaluiert und bei den Testmessungen dieser Dissertation integriert (Kap. 5.2).

Für das Geomonitoring eignen sich unter den hier diskutierten praktischen Gesichtspunkten softwarebasierte Registrierungsverfahren. Jedoch wird bei den Verfahren grundsätzlich davon ausgegangen, dass in den überlappenden Bereichen keine signifikanten Veränderungen vorhanden sind. Diese Hypothese ist innerhalb eines Deformationsmonitorings nicht zu halten. Eine Nichtberücksichtigung führt zu fehlerhaften Re-

gistrierungen (Wujanz, 2012). Es ist daher von entscheidender Bedeutung, deformierte Bereiche zu segmentieren und aus der Schätzung der Transformationsparameter auszuschließen (Wujanz et al., 2018a). Wujanz et al. (2014a) und Wujanz et al. (2014b, 2016) stellen mit den Algorithmen DefoScan++ und ICProx Möglichkeiten vor, wie eine solche Prozessierungskette innerhalb eines Geomonitorings mittels TLS aussehen kann. Friedli und Wieser (2016) stellt eine vergleichbare Methode vor, und in Friedli (2020) wird der zuvor genannte Sachverhalt anhand eines praktisches Experiments bestätigt. Y. Yang und Schwieger (2022) stellt zusätzlich eine vergleichbare Methode auf Basis einer Supervoxel-basierten Registrierung vor.

2.5.2. Geodätische Refraktion

Eine zusätzliche Herausforderung bei der Anwendung von PLS besteht darin, dass variierende atmosphärische Bedingungen die Messungen in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung beeinflussen, sodass sich Signifikanzniveaus nachteilig verändern und Fehlinterpretationen der Messdaten möglich sind. Friedli et al. (2019) beschreiben ein Experiment, bei dem zeitlich variierende Effekte deutlich sichtbar sind und der Einfluss atmosphärischer Refraktion Magnituden mehrerer Dezimeter annimmt. Atmosphärenbedingte Messabweichungen innerhalb geodätischer Messungen sind seit dem letzten Jahrhundert bekannt, erhalten aber durch das Aufkommen von PLS und die damit verbundene quasi-zeitkontinuierliche Erfassung neue Relevanz. Der Einfluss ist zu berücksichtigen und lässt sich bspw. nicht durch kampagnenweise Messungen zu ausgewählten Messzeitpunkten minimieren.

Im Zusammenhang mit sich ändernden atmosphärischen Bedingungen wurde festgestellt, dass die Schwankungen der Oberflächenmessungen die zu erwartende Messgenauigkeit in einigen Anwendungsfällen wie der stündlichen Küstenüberwachung (Anders et al., 2019; Kuschnerus et al., 2021b) oder der Gletscherüberwachung (Voordendag et al., 2021) deutlich übersteigen. Nach Brunner (1992) wird anerkannt, dass die größte Einschränkung für eine weitere Steigerung der Messgenauigkeit der Einfluss des Ausbreitungsmediums ist. Resultierende Punktwolken werden durch die Effekte verfälscht und Scheindeformationen wirken auf das Messergebnis. Fehlinterpretationen innerhalb eines automatisierten Echtzeitassistenzsystems führen zu einem Vertrauensverlust bei den Stakeholdern und mindern die Akzeptanz.

Aufgrund der zeitlich und räumlich variierenden Dichteverteilung der Luft in der Atmosphäre sind die Auswirkungen während eines Messvorgangs systematisch, aber nicht linear (Friedli, 2020). Entsprechend der Erläuterungen in Kapitel 2.2.3 können atmosphärische Einflüsse aufgrund ihres systematischen Erscheinungsbildes nur unzureichend berücksichtigt werden. Aus diesem Grund gilt es in diesem Kapitel, die theoretischen Grundlagen atmosphärischer Einflüsse im Kontext optischer Messverfahren zu beschreiben. Auf Basis des GUM (Kap. 2.2.3) sind mittels der hier getätigten Ausführungen die Messunsicherheiten quantitativ zu ermitteln (Kap. 2.2.3), sodass eine adäquate Berücksichtigung erfolgen kann.

In den meisten Fällen (so auch beim TLS bzw. PLS) werden elektromagnetische Signale für Messungen im Bereich der Geodäsie verwendet, die sich durch die Erdatmosphäre ausbreiten (Brunner, 1992). Kabashi (2003) führt aus, dass beim Durchgang elektromagnetischer Wellen durch ein Medium variabler Dichte Änderungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Ausbreitungsrichtung auftreten. Nach Brunner

(1984) müssen Korrekturen vorgenommen werden, um die Auswirkungen zu berücksichtigen. Analog zu Brunner (1984) werden in dieser Dissertation unter dem allgemeinen Begriff der geodätischen Refraktion sowohl der atmosphärische Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit als auch die Variation in der Richtungsmessung eines elektromagnetischen Signals zusammengefasst.

Nach Eschelbach (2009) hat sich als Maß zur Beurteilung der optischen Dichte in der Geodäsie der Brechungsindex durchgesetzt (Gl. 2.6). Der Brechungsindex

$$n = \frac{c_o}{c} \tag{2.6}$$

berechnet sich als Quotient von c_0 (Vakuumlichtgeschwindigkeit) und c (Lichtgeschwindigkeit im entsprechenden Medium) und hängt von der Wellenlänge λ und den meteorologischen Parametern (Trocken-)Temperatur T_t, Druck p und Partialdruck des Wasserdampfes e_f ab (Eschelbach, 2009). Mit Hilfe der Gleichungen 2.7 bis 2.13 nach IAG (1999) (detailliert erläutert in Joeckel et al. (2008) und Rüeger (1990)) lässt sich der Brechungsindex berechnen. N_g (2.7) beschreibt die Gruppenbrechung (n_g den Gruppenbrechungsindex) bei Standardluft für eine bestimmte elektromagnetische Wellenlänge λ. Die Hilfsvariable x (2.8) ist abhängig von der Temperatur t_0 (Bezugsatmosphäre) bzw. der Temperatur t_L (Tatsächliche Atmosphäre) und wird benötigt, um den Partialdruck des Wasserdampfes in hPa (2.9) in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit h in % zu bestimmen. N_L (2.10) beschreibt die Gruppenbrechung (n_L den Gruppenbrechungsindex) unter tatsächlichen atmosphärischen Bedingungen bzw. N_0 (2.11) die Gruppenbrechung (n_0 den Gruppenbrechungsindex) in einer Bezugsatmosphäre. Ableitend aus den meteorologischen Parametern berechnet sich der Brechungsindex nach Gleichung 2.13.

$$N_g = (n_g - 1) \cdot 10^6 = 287,6155 + \frac{4,88660}{\lambda^2} + \frac{0,06800}{\lambda^4} \tag{2.7}$$

$$x_L = \frac{7,5 \cdot t_L}{237,3 + t_L} + 0,7857 \; bzw. \; x_0 = \frac{7,5 \cdot t_0}{237,3 + t_0} + 0,7857 \tag{2.8}$$

$$e_L = \frac{h_L}{100} \cdot 10^{x_L} \; bzw. \; e_0 = \frac{h_0}{100} \cdot 10^{x_0} \tag{2.9}$$

$$N_L = (n_L - 1) \cdot 10^6 = \left(\frac{273,15}{1013,25} \cdot \frac{N_g p_L}{t_L + 273,15} \right) - \frac{11,27 \cdot e_L}{t_L + 273,15} \tag{2.10}$$

$$N_0 = (n_0 - 1) \cdot 10^6 = \left(\frac{273,15}{1013,25} \cdot \frac{N_g p_0}{t_0 + 273,15} \right) - \frac{11,27 \cdot e_0}{t_0 + 273,15} \tag{2.11}$$

$$n_L = \frac{N_L}{10^6} + 1 \; bzw. \; n_0 = \frac{N_0}{10^6} + 1 \tag{2.12}$$

$$n = \frac{n_0 - n_L}{n_L} \tag{2.13}$$

Weil der Brechungsindex n die optische Dichte des Ausbreitungsmediums repräsentiert, das durch die variablen meteorologischen Parameter gekennzeichnet wird, variiert er nach Hennes (2002) zeitlich als auch entlang des Ausbreitungswegs. Der Brechungsindex n ist somit abhängig von Position und Zeit:

$$n = n(x, y, z, t) \tag{2.14}$$

Refraktionsbedingte Fehler geodätischer Messungen sind ebenfalls abhängig von Ort und Zeit und variieren entsprechend (Friedli, 2020). Daher ist es wichtig, den Anteil der verschiedenen Einflussgrößen zu kennen, mit dem der Brechungsindex beeinflusst wird. In Anlehnung an Hennes (2002) hat Friedli (2020) den Einfluss der meteorologischen Parameter auf die Strecken- und Richtungsmessung abgeschätzt. Dabei geht er im Sinne einer Vereinfachung des Problems davon aus, dass der Brechungsindex n entlang der Visurlinie konstant ist. Die Gleichungen 2.15 und 2.16 zur Berechnung der Distanzkorrektur ΔD und des Refraktionswinkels β vereinfachen sich, wobei l die gesamte Messstrecke und dn/dq die Ableitung des Brechungsindex senkrecht zur Messstrecke bezeichnen:

$$\Delta s = (n_0 - n_L)\, l \tag{2.15}$$

$$\beta = -\frac{l}{2}\frac{dn}{dq} \tag{2.16}$$

Für die Gleichungen 2.15 und 2.16 wird jeweils das totale Differential gebildet:

$$d\Delta D = \left(\frac{\partial n}{\partial T}dT + \frac{\partial n}{\partial p}dp + \frac{\partial n}{\partial H}dH + \frac{\partial n}{\partial x_\mathrm{c}}dx_\mathrm{c} + \frac{\partial n}{\partial \lambda}d\lambda\right) D \tag{2.17}$$

$$d\beta = -\frac{l}{2}\left(\frac{\partial n}{\partial T}d\frac{dT}{dq} + \frac{\partial n}{\partial p}d\frac{dp}{dq} + \frac{\partial n}{\partial H}d\frac{dH}{dq} + \frac{\partial n}{\partial x_\mathrm{c}}d\frac{dx_\mathrm{c}}{dq} + \frac{\partial n}{\partial \lambda}d\frac{d\lambda}{dq}\right) \tag{2.18}$$

Friedli (2020) nutzt die Gleichungen 2.17 und 2.18 zur Bestimmung der sensitiven Einflussgrößen. Durch das Einsetzen der Werte für eine Standardatmosphäre ($T = 20$°C, $p = 1013{,}25$ hPa, $H = 50$ % rH und $x_c = 400$ ppm) und eine Wellenlänge $\lambda = 1550$ nm können die totalen Differentiale bestimmt werden. Das Ergebnis ist der Tabelle 2.4 zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass Friedli (2020) statt des Partialdrucks des Wasserdampfes e_f die relative Luftfeuchtigkeit H als meteorologischen Parameter verwendet und zusätzlich den CO_2-Gehalt der Luft als beeinflussenden Parameter einführt.

Tab. 2.4.: Auswirkung der Unsicherheit der meteorologischen Eingangsgrößen auf das Ergebnis der Streckenkorrektur und des Refraktionswinkels (Friedli, 2020).

Einfluss von:	Einflussfaktor
$\partial n_g/\partial T$	-1 ppm/K
$\partial n_g/\partial p$	0,3 ppm/hPa
$\partial n_g/\partial H$	-0,005 ppm/%rH
$\partial n_g/\partial x_\mathrm{c}$	0,00015 ppm/ppm
$\partial n_g/\partial \lambda$	-0,003 ppm/nm

Nach Hennes (2002) wird deutlich, dass sowohl die absolute Temperatur als auch deren Temperaturgradient die Refraktionskorrekturen am meisten beeinflussen. Die räumliche als auch zeitliche Variabilität der meteorologischen Verhältnisse sowie die

Erfassungstechnik an sich haben direkten Einfluss auf die Unsicherheiten der Störparameter. Friedli et al. (2019) nehmen an, dass nur ein residualer Anteil der Abweichungen auf die Laufzeitverzögerung der elektromagnetischen Signale zurückzuführen ist. Es wird unterstellt, dass der größte Anteil auf die vertikale Refraktion zurückzuführen ist (Friedli et al., 2019). Aus diesem Grund sind die weiteren Beschreibungen in diesem Kapitel auf diesen Umstand fokussiert.

Kukuvec (2010) zeigt, dass der Refraktionswinkel in der Geodäsie oftmals durch den dimensionslosen Refraktionskoeffizienten k ersetzt wird. Nach Hirt et al. (2010) wird k als Quotient aus dem mittleren Erdradius R und dem Radius der Beobachtungslinie r berechnet:

$$k = R/r \tag{2.19}$$

Aufgrund der örtlichen als auch zeitlichen Variation der atmosphärischen Zustände leitet Wunderlich (1985) den lokalen Refraktionskoeffizienten χ her. Dieser ist für ein differentielles Stück der Lichtkurve gültig und wird bei Hirt et al. (2010) auf Grundlage von Bahnert (1987) und Joeckel et al. (2008) in Abhängigkeit von Luftdruck p, Temperatur T und dem vertikalen Temperaturgradienten $\partial T/\partial z$ beschrieben:

$$\chi = 503\frac{p}{T^2}\left(0,0343 + \frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{2.20}$$

Wunderlich (1985) gibt an, dass der lokale Refraktionskoeffizient χ im Wesentlichen eine Funktion des vertikalen Temperaturgradienten $\partial T/\partial z$ ist und nur wenig von Luftdruck p und Temperatur T abhängt. Die Proportion für den Einfluss von p, T und $\partial T/\partial z$ auf χ wird von Past (1965) wie folgt angegeben:

$$dx(p) : dx(T) : dx\left(\frac{dT}{dz}\right) = 1 : 2 : 23 \tag{2.21}$$

Hirt et al. (2010) und Reiterer (2012) führen aus, dass der vertikale Temperaturgradient in der unteren Atmosphäre (ca. 20 bis 30 m über der Erdoberfläche) abhängig von der Temperatur an der Erdoberfläche ist. Der Gradient wird durch tägliche Schwankungen beeinflusst (Reiterer, 2012). Daher ist der allgemein gebräuchliche Gaußsche Refraktionskoeffizient von $k = 0{,}13$ für diesen Bereich nicht repräsentativ, und die Wissenschaft führt einen Konsens darüber, dass die präzise Determinierung des Temperaturgradienten in Bodennähe der Schlüssel zur Bereitstellung einer effizienten Korrektur der Vertikalrefraktion darstellt (Ingensand, 2008; Kharaghani, 1987). Sinngemäß beschreibt Eschelbach (2009), dass ein positiver Wert für k streng genommen nur dann gerechtfertigt ist, wenn der Messstrahl nicht durch bodennahe Schichten verläuft.

Der Temperaturgradient ist zeitlich und örtlich variabel und direkt abhängig von der Topographie im Messgebiet. Kukuvec (2010) betont in seiner Arbeit, dass die Veröffentlichung von Hirt et al. (2010) den Anstoß gab, die Mikrometeorologie im Zusammenhang mit der Bestimmung des Refraktionskoeffizienten stärker zu betonen. Die Mikrometeorologie wird durch Foken (2016) nach Glickman (2000) als der Teil der Meteorologie beschrieben, der sich mit Beobachtungen und Prozessen im kleinsten räumlichen ($< 1\ km$) und zeitlichen Maßstab ($1\ Tag$) befasst. Innerhalb dieses räumlichen Maßstabs ist die atmosphärische Grenzschicht zu verorten, die nach Foken (2016) jener untere Teil der Troposphäre ist, der durch die thermischen Eigenschaften der Unterlage

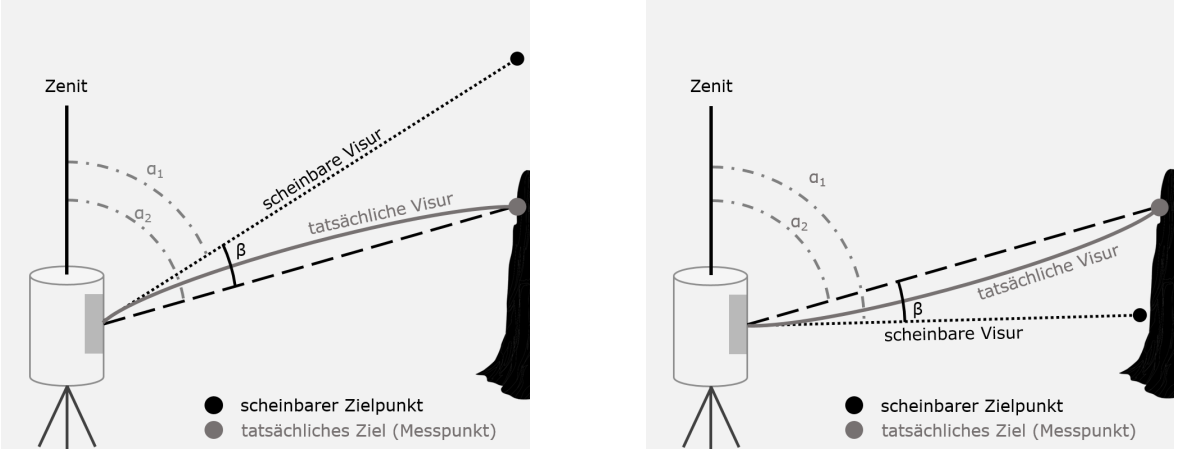
beeinflusst wird. Hirt et al. (2010) fassen die Zusammensetzung der atmosphärischen Grenzschicht sehr gut zusammen.

Bei Hirt et al. (2010) wird beschrieben, dass in der mittleren und höheren atmosphärischen Grenzschicht (20-30 m bis 1-2 km: Ekman-Schicht (Foken, 2016)) die Temperatur der Erdoberfläche nahezu keinen Einfluss auf den Temperaturgradienten hat. Die Temperatur sinkt konstant mit $\partial T/\partial z$ = -0,006 K/m. Verschiedene Studien zeigen, dass der Refraktionskoeffizient von k = 0,13 in diesem Bereich der Atmosphäre gerechtfertigt ist (Hirt et al., 2010). Positive Koeffizienten führen zu einem dem Erdradius gleichgerichteten Messstrahl (Abb. 2.10a).

Die unteren 20-30 m der atmosphärischen Grenzschicht werden bei Foken (2016) als Bodenschicht (Prandtl-Schicht) bezeichnet. In diesem Bereich ist der Temperaturgradient stark von der Erwärmung der Erdoberfläche abhängig und somit von der Sonneneinstrahlung (Hirt et al., 2010). Nach Casott und Deussen (2000) wird durch die Sonne dem Erdboden Energie zugeführt, die dieser an die darüberliegenden Luftschichten wieder abgibt. Der Transfer der Wärme an die anliegende Luft erfolgt mittels eines Konvektionsaustauschs und bewirkt eine turbulente Durchmischung der bodennahen Luftschichten (Casott & Deussen, 2000). In der Geodäsie sind Konvektionen als Szintillation bekannt (Hirt et al., 2010) und führen zu negativen vertikalen Temperaturgradienten. Das Zusammenspiel zwischen der Erdoberfläche und den darüberliegenden Luftschichten beschreibt Foken (2016) mit Hilfe der Energiebilanz an der Erdoberfläche über den Tageszyklus. Als Hauptenergieumsatzfläche ist die Erdoberfläche maßgeblich für atmosphärische Prozesse verantwortlich. Dabei wird sie durch die Sonneneinstrahlung erwärmt und gibt in Form des fühlbaren Wärmestroms Wärme an die darüber liegende Luftschicht ab. Eine detailliere Beschreibung würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen, sodass auf das Fachbuch von Foken (2016) verwiesen wird. Die bodennahe turbulente Atmosphäre setzt sich aus Wirbeln unterschiedlicher Größe zusammen, die sich zufällig im Raum bewegen. Die räumliche als auch zeitliche Varianz der Turbulenzen wirken restriktiv auf die Bereitstellung einer Korrektur. Praktische Messungen von Hennes (2006) zeigen einen Temperaturgradienten von $\partial T/\partial z$ = -0,5 K/m und daraus ableitend einen lokalen Refraktionskoeffizienten von χ = -2,9, was nicht nur eine große Differenz im Wert selber ist, sondern durch den Vorzeichenwechsel auch eine konkav gekrümmte Bahn des Lichtweges bedeutet (Abb. 2.10b).

Die untere Bodenschicht in einer Höhe von 1-3 m ist durch starke Turbulenzen bei Sonneneinstrahlung gekennzeichnet. Brocks (1950) zeigte, dass mit abnehmender Geländehöhe die refraktiven Effekte steigen. Verschiedene Veröffentlichungen deuten auf ein scheinbar unberechenbares Verhalten der Refraktionseffekte in Bodennähe hin. Es werden Werte für χ von -4 bis +6 nachgewiesen, die im Tagesgang stark variabel sind. Die Variabilität von χ bzw. $\partial T/\partial z$ ist u.a. bei Angus-Leppan (1969), Brocks (1950), Casott und Deussen (2000), Frukacz et al. (2017), Hirt et al. (2010), Hübner (1977), Kabashi (2003), Kharaghani (1987), Kukuvec (2010) und Stober (1995) nachzulesen. Ergänzend dazu weisen Hirt et al. (2010) und Kharaghani (1987) für Höhen unterhalb von 1 m Extremwerte für χ von -8 bis +16 nach, was nochmals die in der geodätischen Praxis übliche Herangehensweise bestätigt, Visuren knapp über dem Boden liegend zu vermeiden. Die Aufteilung der atmosphärischen Grenzschicht nach Foken (2016) ist in Abbildung 2.11 zusammengefasst.

Serafin et al. (2018) führen aus, dass der tägliche Zyklus der Strahlungs- und Energiebilanz an der Erdoberfläche zu abwechselnden Phasen der Erwärmung und Abkühlung



(a) Refraktionswinkel (pos.), Strahl ist zur Erde hin gekrümmt.

(b) Refraktionswinkel (neg.), Strahl ist von der Erde weg gekrümmt.

Abb. 2.10.: Einfluss der vertikalen Refraktion: Das Signal wird unter dem Vertikalwinkel α_1 ausgesendet und aufgrund von geodätischer Refraktion abgelenkt. Der tatsächliche Messpunkt befindet sich unter dem Vertikalwinkel α_2. Die Differenz beider Winkel ist der Refraktionswinkel β. Der Refraktionskoeffizient ist in der Abbildung dem Refraktionswinkel gleichzusetzen. Abbildungen auf Basis von Friedli (2020).

der Luftschichten in den untersten Bereichen der Atmosphäre führen. Ist das Gelände flach und homogen, werden Turbulenzen durch Schichtung und Auftriebseffekte tagsüber angeregt und nachts unterdrückt (Serafin et al., 2018). Wenn die Topographie dagegen heterogen ist, wird der tägliche Zyklus der Strahlungs- und Energiebilanz zusätzlich durch die Baroklinität beeinflusst. Baroklinität entsteht durch unterschiedliche Erwärmung oder Abkühlung und führt zur organisierten Luftströmungen (Serafin et al., 2018). Im Bereich von Gebirgsregionen reagieren Windsysteme auf thermische Kontraste im Maßstab eines einzelnen Hangs, eines Tals oder einer ganzen Gebirgskette (Whiteman, 2000; Zardi & Whiteman, 2013). Im alpinen Bereich wird bei schönem ruhigem Hochdruckwetter tagsüber ein bergwärts gerichteter und nachts talwärts gerichteter Wind beobachtet (Malberg, 2007). Malberg (2007) beschreibt außerdem, dass sich die am Tage in den Berghängen aufliegende Luft stark erwärmt, während die in gleicher Höhe über dem Talboden befindliche Luft kühler ist, da sie nur langsam erwärmt. Die geringere Dichte von warmer Luft sorgt für den Auftrieb.

Gleichung 2.16 lässt sich nach Brocks (1939) ausführlich als negatives Integral über die Wegstrecke beschreiben:

$$\delta_A \approx -\int_0^l \left(1 - \frac{s}{l}\right) \frac{\partial n(s)}{\partial z} ds \tag{2.22}$$

Kukuvec (2010) führt aus, dass anhand der Gewichtsfunktion $(1 - (s/l))$ erkennbar ist, dass meteorologische Bedingungen in der Nähe des Gerätestandpunktes stärker in die integrale Summe einfließen. Brocks (1939) unterteilt die gesamte Wegstrecke des Messstrahls in vier Strahlabschnitte und beschreibt den Einfluss auf den Refraktionswinkel.

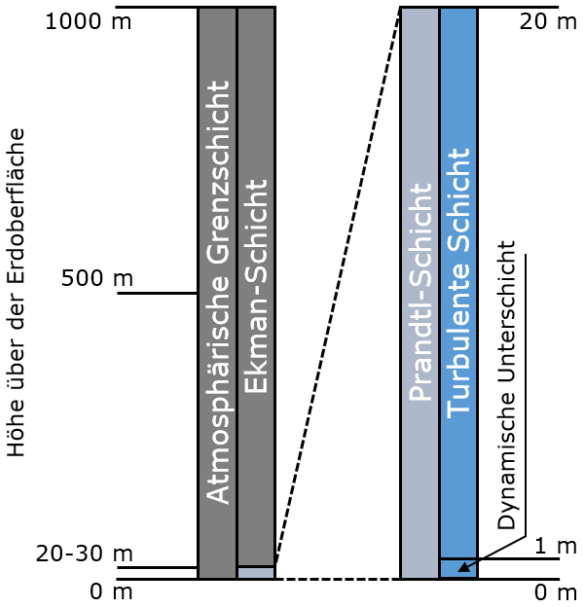


Abb. 2.11.: Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht nach Foken (2016).

Tab. 2.5.: Beiträge der einzelnen, vom Messplatz aus gezählten Strahlabschnitte an der dort beobachteten Refraktionsschwankung (Brocks, 1939).

Strahlabschnitt	[%]
1. Viertel	43,8
2. Viertel	31,2
3. Viertel	18,8
4. Viertel	6,2

Tabelle 2.5 zeigt die Abhängigkeit des Refraktionswinkel vom nahen Umfeld um den Instrumentenstandpunkt. 43,8 % des Einflusses entstehen bereits auf den ersten 25 % der Wegstrecke. Bereits 75 % des Einflusses sind bei der Hälfte der Beobachtungsvisur erreicht. Brocks (1939) führt außerdem aus, dass Änderungen der meteorologischen Verhältnisse im ersten Zehntel des Strahles 19-mal stärkere Refraktionsänderungen verursachen als solche im letzten Zehntel.

2.5.3. Geodätisches Monitoring mittels terrestrischer Laserscanner

Mittels TLS ist die klassische Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, die zum Beispiel mittels tachymetrischer Messungen vollzogen werden, nicht möglich. Wujanz (2016) beschreibt jedoch, dass seit der methodischen Entwicklung geodätischer Deformationsmessungen zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die wesentliche Prozessierungskette bei der Auswertung von Überwachungsmessungen unverändert ist. Die Wahl geeigneter Aufnahmestandpunkte, die Messung von Messpunkten in mindestens zwei Epochen, die Überführung der Punktkoordinaten in ein gemeinsames Koordinatensystem und die Ableitung von Deformationsvektoren beschreiben diesen Prozess. Vielfältige Auswertemethoden, so wie sie bei Heunecke et al. (2013) vorgestellt wer-

den, basieren auf klar identifizierbaren und vermarkten Messpunkten (Holst et al., 2014). Verfahren zur Bestimmung eines statistischen Nachweises einer Punktidentität zwischen zwei Messepochen (bspw. das Kongruenzmodell) können u.a. bei Niemeier (2008) nachvollzogen werden.

In der ursprünglichen Vorgehensweise zur Erfassung von Deformationsvorgängen wird von einem rekursiven Vorgang gesprochen. Dies bedeutet, dass bereits gewonnene Erkenntnisse oder ein gewisses Vorwissen über das Bewegungsverhalten eines zu überwachenden Objektes zur Diskretisierung im Geometrie- als auch Zeitbereich vorhanden sein muss (Heunecke et al., 2013). Die Qualität einer Überwachungsmessung korreliert direkt mit der Qualität der vorhandenen Wissensbasis. Wunderlich et al. (2019) sehen genau hier aber die Stärke der klassischen, auf in beiden Epochen identen Messpunkten aufbauenden Vorgehensweise. Der Vorteil liegt in der konsequenten Ausrichtung der Deformationsanalyse auf den Signifikanznachweis. Die zeitaufwändige Signalisierung, Bewegungen, die nicht in signalisierten Bereichen auftreten oder Bewegungen, die unerkannt bleiben, beschreibt Wujanz (2016) als wesentlichen Nachteil der klassischen Methodik.

Nach Wunderlich et al. (2019) verspricht das Monitoring mittels TLS, diese Randbedingungen zu überwinden. Wegen der reflektorlosen Abtastungstechnik entfällt die Vermarkung ausgewählter Punkte, und es kann darauf verzichtet werden, Objekte unter einer eventuell vorliegenden Gefährdung zu betreten. Des Weiteren wird ein Überwachungsobjekt vollständig in einem Punktraster erfasst, sodass Bewegungen auch dort aufgedeckt werden, wo sie unter Umständen gar nicht vermutet werden (Wunderlich et al., 2019). Trotz der Vielzahl an vorhandenen Messpunkten sind diese als Einzelpunkte zwischen zwei Messepochen nicht als ident anzusehen und eine Signifikanzprüfung auf die Differenz schlägt fehl. Holst et al. (2017b) beschreiben zwar, dass die durch das Winkelraster vorgegebene Punktverteilung reproduzierbar ist, die exakte Position der Punkte am Objekt selber aber nicht.

Gegenüber den klassischen Analysemethoden sind in einem weiteren Verarbeitungsschritt Punktkorrespondenzen (homologe Punkte) aus den mehrepochalen Punktwolken abzuleiten. In den letzten Jahren wurden hierzu verschiedene Ansätze entwickelt und kategorisiert. Ohlmann-Lauber und Schäfer (2011) ordnen verschiedene Analysemethoden fünf Kategorien zu. Entsprechend dieser Einordnung können bei Wunderlich et al. (2016) methodische Herausforderungen und bei Neuner et al. (2016) dazugehörige Anwendungsbeispiele nachgeschlagen werden. In dieser Arbeit wird sich an der Eingruppierung von Harmening und Neuner (2020) und Mukupa et al. (2017) orientiert. Die Autoren nutzen drei Kategorien: Den Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Fläche- und Fläche-zu-Fläche-Vergleich.

Obwohl beim Punkt-zu-Punkt-Vergleich Punkte in zwei unterschiedlichen Messepochen nicht identisch angemessen werden können, nutzt Little (2006) den direkten Vergleich des Punktabstands homologer Punkte entlang eines Normalenvektors ausgehend vom Scannerursprung zu den Messpunkten. Diese Methode ist daher auf statische Installationen limitiert. Um Punkte aus mehrepochalen Punktwolken vergleichbar zu machen, sind in den letzten Jahren unterschiedliche Ansätze entwickelt wurden, um Punktkorrespondenzen abzuleiten. Nach Wujanz (2018) ist die einfachste Lösung in der Bildung von Punktpaaren zu finden, bei denen der minimale Abstand zwischen zwei Punktwolken gebildet wird. Beispiele sind hier bei Besl und McKay (1992) und Girardeau-Montaut et al. (2005) zu finden, deren Anwendungen im Kontext der Re-

gistrierung bzw. Deformationsmessung einzuordnen sind. Alternativen sind im mittlerweile weit verbreiteten M3C2-Algorithmus (Lague et al., 2013) zu finden. Ausgehend von einer Ebene, die sich mittels einer Berechnung aus einer Menge von Punkten innerhalb eines auszuwählenden Suchradius um sogenannte Corepoints berechnet, wird entlang des Normalenvektors der Abstand zu einem nächstgelegenen Punkt aus der zu vergleichenden Punktwolke bestimmt. Der Abstand wird auf Signifikanz geprüft. Wobei sich die jeweiligen Varianzen aus der Ebenenausgleichung und optional einer globalen Registrierungsungenauigkeit ergeben. Winiwarter et al. (2021) erweitern diesen Ansatz hin zu M3C2-EP, in dem die Varianzen mittels strenger Fehlerfortpflanzung berechnet werden. Eine aktuelle Methode von Raffl und Holst (2022) nutzt den ICP-Algorithmus als Grundlage für eine klassische Deformationsanalyse. Dabei werden nach einer ICP-Registrierung korrespondierende Punkte als virtuelle Zielpunkte einer Netzausgleichung zugeführt. Neuartige Verfahren, bspw. F2S3 (Feature to Feature Supervoxelbased Spatial Smoothing) von der ETH Zürich (Gojcic et al., 2020) ermitteln mittels eines Featuredeskriptors eindeutig identifizierbare Punkte in den verschiedenen Messepochen.

Harmening und Neuner (2020) beschreiben, dass bei Verwendung der zweiten Strategie (Punkt-zu-Fläche-Vergleich) eine der beiden Punktwolken durch eine Fläche approximiert wird. Die Deformation wird als Abstand eines Punktes in der zu vergleichenden Epoche zur Referenzfläche bestimmt. Beispiele für diese Methode können bei Cignoni et al. (1998), Erdélyi et al. (2017), Harmening und Neuner (2020), Holst et al. (2015), Ioannidis und Valani (2006), Pesci et al. (2013), Serantoni und Wieser (2016) und Zogg und Ingensand (2008) gefunden werden. Referenzflächen in diesen Publikationen sind Paraboloide oder Ebenen, vermaschte Gitter oder nicht-uniforme rationale B-Splines (NURBS). Alternativ zur zweiten Strategie lassen sich die Parameter analytischer Funktionen vergleichen. Alba et al. (2006), Eling (2009), Lindenbergh und Pfeifer (2005), Müller et al. (2016) und Vezočnik et al. (2009) zeigen praktische Anwendungen dieser Methodik. Außerdem zeigen Kermarrec et al. (2022a) und Kermarrec et al. (2023) das Potential lokal optimierter B-Splines (LR B-Splines) für die räumlichzeitliche Visualisierung von Deformationsmustern auf. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Monitoring natürlicher Objekte. Bei der Beschreibung der drei Strategien fällt bereits auf, dass der Fokus auf punktbasierten Verfahren liegt. Die Anwendungen analytischer Flächen ist bei nicht regelmäßigen Strukturen anspruchsvoll. Nach Winiwarter et al. (2021) ist der M3C2-Algorithmus Stand der Technik in der geomorphologischen Veränderungsanalyse und wird unter anderem von Anders et al. (2020) und Holst et al. (2021) angewendet. Holst et al. (2021) nutzen jedoch auch einen lokalen ICP zur Ableitung von Deformationswerten und stellen zusätzlich einen featurebasierten Ansatz vor, der Deformationsvektoren ableitet. ICP-basierte Verfahren werden ebenfalls bei Pfeiffer et al. (2018) und Teza et al. (2007) verwendet. Barbarella et al. (2017) mittels eines DEM (Digital Elevation Model), Abellán et al. (2009) mit Hilfe eines Mesh oder Fey und Wichmann (2017) mit lokalen Ebenen in beiden Punktwolken stellen weitere Alternativen für die Deformationsmessung an natürlichen Objekten vor.

2.6. Zusammenfassende Betrachtungen

Anforderungen an Deformationsmessungen mittels TLS sind in den letzten 15 Jahren innerhalb der Ingenieurgeodäsie vielfach diskutiert worden (u.a. Holst und Kuhlmann (2016) oder Wunderlich et al. (2016)). Der technische Fortschritt macht es möglich, dass heutzutage Objekte mittels PLS mit hoher räumlicher als auch zeitlicher Auflösung sowie autonom aus großen Distanzen überwacht werden können. PLS ist für die Implementierung innerhalb eines automatisierten Monitoringsystems prädestiniert und hat enormes Potential, im Zuge eines aktiven Monitorings (Kap. 2.2.1) eingesetzt zu werden. Wujanz et al. (2019) fokussieren sich in ihrer Veröffentlichung zwar auf das Thema der Registrierung, jedoch haben deren Aussagen auch bei den weiteren Prozessierungsschritten eine Relevanz. Demnach scheint es (*unbewusst*) einen breiten Konsens bei den Anwendern darüber zu geben, dass durch den technischen Fortschritt hochgenaue 3D-Vermessungen bis hin zum finalen Produkt trivial erscheinen und eine geodätische oder technische Expertise nicht notwendig sei. Eine unzureichende Kenntnis der beeinflussenden Faktoren kann jedoch zu falschen Rückschlüssen führen. Eine mangelnde Kenntnis physikalischer und methodischer Grenzen bei der Nutzung von PLS kann zu unrealistischen Erwartungen führen. Dies kann wiederum zu einer mangelnden Akzeptanz des Systems führen, die neben der Bewältigung der Messaufgabe an sich ein wesentliches Kriterium für die verschiedenen Interessengruppen darstellt.

Die Literaturrecherche in Kapitel 2 zeigt, dass es im Sinne des GUM (Kap. 2.2.3) aufgrund der neuen Technik und Methodik an quantifizierbaren Erfahrungswerten im Umgang mit PLS mangelt. Obwohl in Kapitel 2.4 dargestellt wird, dass die Zahl der Veröffentlichungen zu PLS in den letzten Jahren zugenommen hat und Erfahrungswerte in den jeweiligen Implementierungen gesammelt wurden, hat sich bei den unterschiedlichen Implementierungen bisher kein grundlegender Workflow etabliert. Dabei sind fundamentale Prozessschritte bei den verschiedenen Forschungsgruppen identisch.

Bisher fließt für die Messkonzeption das individuelle Wissen der jeweiligen Experten ein oder das Messprogramm ist direkt an die Erfordernisse der Informationsextraktion angepasst. Beim PLS handelt es sich um eine sehr junge Spezialdisziplin innerhalb des Themenkomplexes eines ingenieurgeodätischen Monitorings, sodass es an fundamentalen Normen, Richtlinien sowie einem einheitlichen, transparenten Workflow fehlt, der für alle Beteiligten nachvollziehbar und reproduzierbar ist.

Methodische Anforderungen an die Datenerfassung selbst, beim Datenmanagement und der bi- und multitemporalen Datenanalyse sind komplex oder neue Herausforderungen durch das nahezu permanente Messen kommen hinzu. Nach dem heutigen Kenntnisstand ist nicht mehr die Messtechnik an sich, sondern vielmehr die methodische Kompetenz bei der qualitätsgesicherten Transformation von Daten hin zu Informationen eine der wesentlichen Herausforderungen. Dazu gehören bspw. die Registrierung der multitemporalen Scandaten untereinander, die Detektion zeitabhängiger Artefakte als systematische Abweichungen in den jeweiligen Zeitreihen und der damit verbundenen Diskussionen des Signal-Rausch-Verhältnisses oder generell die Informationsextraktion aus den multitemporalen Datensätzen. Grundlegend sind Fehlereinflüsse auf die Messergebnisse eines Long Range TLS bekannt und waren in den Dissertationen von Wujanz (2016) und Friedli (2020) Thema. Die bisherigen Untersuchungen zur Registrierung von Punktwolken (Kap. 2.5.1) und atmosphärischen Einflüssen (Kap. 2.5.2) haben oft nur Daten verwendet, die auf einigen wenigen Messwerten über einen

begrenzten Zeitraum von wenigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen beruhen. Die Ergebnisse, Schlussfolgerungen und daraus abgeleitete Empfehlungen sind nur bedingt auf multitemporale Beobachtungen über lange Zeiträume übertragbar. Heutige technische und methodische Möglichkeiten lassen tiefergehende Untersuchungen zu. Bei der Anwendung von PLS über mehrere Wochen und Monate werden aufgrund von hohen Messintervallen systematische Einflüsse sichtbar, die bisher bei Einzelmessungen nicht dominant waren.

Das Kapitel 2.5.3 befasst sich mit der Herleitung von Punktkorrespondenzen aus mehrepochalen Punktwolken zur Durchführung von Überwachungsmessungen. Verschiedene Methoden werden in Form von Literaturverweisen vorgestellt. Die technischen Möglichkeiten zur Durchführung von PLS sind erst seit wenigen Jahren gegeben, sodass die automatisierte Analyse von multitemporalen Scandaten bisher wenig untersucht ist. Einige Ansätze sind vielversprechend, trotzdem fehlt es noch an einem zielgerichteten Prozess, um automatisch Informationen aus der Vielzahl an Daten zu extrahieren. Bei der Bearbeitung des Unterkapitels 2.2 fällt zudem auf, dass es an systematisch aufgebauten Handlungsanweisungen in Form von Normen und Richtlinien fehlt, die explizit PLS als Methodik innerhalb von Überwachungsaufgaben beschreiben. Der Grund liegt sicherlich auch in dem Umstand, dass es sich um eine neuartige Methodik handelt. Die Nutzung nach allgemein anerkannten Anweisungen auf Grundlage empirischer Erkenntnisgewinne würde die Akzeptanz und das Vertrauen in der Anwendung fördern.

Die Literaturrecherche zeigt, dass eine systematische Untersuchung fehlt, die die komplette Prozesskette eines PLS von der Datenerfassung bis zur Informationsextraktion umfasst. Konkret wurde sich in vorangegangen Studien auf folgende Aspekte hinsichtlich eines PLS nicht fokussiert:

- Die Beschreibung eines ganzheitlichen Workflows, der die jeweiligen Komponenten von PLS darstellt.
- Die Systematisierung des Themas PLS in Teildisziplinen und daraus ableitend die Formulierung von Handlungsempfehlungen für potentielle Anwender.
- Die Untersuchung atmosphärischer Einflüsse auf die Datenerfassung eines PLS über ausgedehnte Zeitreihen, die über selektierte Messzeitpunkte hinausgehen.
- Die Adaption von datenbasierten Registrierungsmethoden auf die Anwendung von multitemporalen Punktwolken.
- Eine automatisierte Methode zur Informationsextraktion hinsichtlich der Identifizierung relevanter Veränderungen in multitemporalen Datensätzen.

3. Ziel und abgeleiteter Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit

Auf Basis der in Kapitel 2.6 herausgearbeiteten methodischen Lücken in Bezug zu PLS lassen sich drei übergeordnete Handlungsfelder für die Bearbeitung in dieser Dissertation extrahieren. Die Untersuchungsziele 1 und 2 befassen sich mit dem Thema der Qualitätssicherung von Messwerten, die mittels PLS erfasst werden. Hier wird der Fokus auf die Bewertung bereits bekannter Einflüsse von unterschiedlichen Registrierungsmethoden und der Atmosphäre gelegt.

> **Untersuchungsziel 1:** Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Registrierungsmethoden multitemporaler Punktwolken und deren Einfluss auf die Interpretation von Deformationsergebnissen.

> **Untersuchungsziel 2:** Untersuchung atmosphärischer Einflüsse auf die Messergebnisse eines PLS und deren Berücksichtigung innerhalb der Messaufbaus.

Im Zuge eines Echtzeitassistenzsystems sind relevante Informationen einer PLS-Messung in einer leicht verständlichen Repräsentation verfügbar zu machen. Methodisch ist es wichtig, die Informationen in einem zielführenden Detaillierungsgrad den Anwendern bereitzustellen, sodass schnellstmöglich Rückschlüsse für ein weiteres Handeln möglich sind.

> **Untersuchungsziel 3:** Semiautomatische Informationsextraktion in relevanten Bereichen aus den 4D-Messdaten in naher Echtzeit als auch im Postprozess.

Die Anwendungen von PLS sind vielfältig und werden aufgrund der zunehmend komplexeren Aufgabenstellungen beim Monitoring unterschiedlichster Objekte auch zukünftig nur interdisziplinär lösbar sein. Analog zu den Betrachtungen von Benndorf (2021) ist bei dieser Anwendung die schnelle Nutzung aller verfügbaren Daten zur Ableitung von aktuellen Informationen zur Steuerung von Prozessen im Zuge eines integrativen Monitorings besonders herausfordernd. Daten erhalten nach Resnik (2021) durch die Hinzunahme von Expertenwissen aus dem interdisziplinären Umfeld Semantik und generieren über die geometrische Information hinaus wertvolle Hinweise. Grundsätzliches Ziel dieser Arbeit ist die konzeptionelle Entwicklung eines Echtzeitassistenzsystems, welches relevante Informationen möglichst automatisiert, qualitätsgesichert den unterschiedlichen Stakeholdern zur Verfügung stellt und Hinweise zu abnormalen Verhalten eines Überwachungsobjektes liefert. Es ist wesentlich, dass eine breite Akzeptanz eines solchen Systems bei den relevanten Nutzern erlangt wird. Dies ist nur durch ei-

ne transparente Vorgehensweise erreichbar, indem der Workflow auf entsprechenden Normen, Richtlinien und allgemein anerkannten Grundsätzen aufbaut. Deshalb ist es unerlässlich, dass bei der Konzipierung des Systems der komplette Prozess hinsichtlich der Minimierung von Fehlinterpretationen und der Steigerung der Zuverlässigkeit sowie relevanter Einflüsse verstanden wird. Darauf aufbauend, wird in dieser Arbeit ein Konzept zum Monitoring mittels PLS vorgestellt, das alle Phasen von der Messwerterfassung bis hin zur Informationspräsentation beschreibt.

> **Untersuchungsziel 4:** Konzeption eines belastbaren Workflows zur Implementierung von PLS in einem webbasierten Echtzeitassistenzsystem.

Abgrenzung der Arbeit: Den Rahmen dieser Arbeit bilden die zuvor dargestellten Untersuchungsziele. Bei den Untersuchungen der Einflüsse von unterschiedlichen Registrierungsmethoden oder der atmosphärischen Refraktion werden keine stochastischen Modelle oder strenge Fehlerfortpflanzungen entwickelt. Es werden vielmehr die relevanten Parameter beschrieben und mittels verschiedener Messreihen werden die möglichen Magnituden der Einflussgrößen empirisch ermittelt. Anhand dieser Erfahrungswerte werden praktische Handlungsempfehlungen herausgearbeitet. In Bezug zum dritten Untersuchungsziel wird innerhalb dieser Arbeit ein Workflow vorgestellt, der es ermöglicht, relevante Informationen automatisiert aus den großen Datenmengen zu extrahieren. Hierbei geht es um eine konzeptionelle Studie und schlussendlich die Empfehlung einer systematischen Vorgehensweise. Die vorgestellten Methoden werden in dieser Konzeptstudie nicht hinsichtlich einer optimierten Parametrisierung oder einem qualitativen Vergleich beurteilt, sondern es wird die Anwendbarkeit an sich evaluiert. Kapitel 4 stellt auf der Grundlage des vierten Untersuchungsziels einen Workflow vor, der systematisch die jeweiligen Schritte einer ganzheitlichen Prozesskette eines PLS von der Datenerfassung bis hin zur Ergebnispräsentation vorstellt. Ergänzend dazu wird in Kapitel 2.2.4 der aktuelle Stand gängiger Normen und Richtlinien präsentiert, die im Zusammenhang mit Überwachungsmessungen stehen. Obwohl diese Arbeit die Begrifflichkeiten systematisch einordnet, bleibt eine Konkretisierung sowie die Empfehlung von PLS zur Übernahme in spezielle Normen oder Richtlinien an dieser Stelle aus.

Gliederung der Untersuchungen und Methoden: Auf Grundlage der herausgearbeiteten Untersuchungsziele wird in dieser Arbeit zunächst ein Echtzeitassistenzsystem auf Basis von PLS konzipiert (Kap. 4). Es wird ein Workflow vorgestellt, der es ermöglicht, das System mittels eines ganzheitlichen Ansatzes innerhalb eines Risikomanagements zu integrieren. Qualitätsbeeinflussende, systematische Abweichungen auf die Messdaten eines Long Range Laserscanners werden in Kapitel 5 präsentiert. Für diese Untersuchungen steht unter anderem ein Datensatz aus dem Valsertal in Österreich aus den Jahren 2020 und 2021 zur Verfügung und stellt aktuell ein Alleinstellungsmerkmal für derartige Untersuchungen dar. Mittels neuartiger Methoden zur Detektion von Prismen in den multitemporalen Punktwolken eines Long Range Laserscanners oder der Bildung von Zeitreihen auf Punktwolken stehen Werkzeuge zur Verfügung, die eine Analyse zeitvariabler Effekte über lange Zeiträume ermöglicht. In Kapitel 6 werden Methoden vorgestellt, mit deren Hilfe automatisiert Informationen aus multitemporalen Datensätzen extrahiert werden können. Die Arbeit wird in Kapitel 7 zusammengefasst und offene Forschungsthemen werden dargestellt.

4. Konzept eines Echtzeitassistenzsystems basierend auf PLS

In Kapitel 2.6 wird beschrieben, dass bisher kein grundlegender Workflow zur Beschreibung fundamentaler Prozessierungsschritte innerhalb der Anwendung von PLS vorhanden ist und daraus resultierend eine Systematisierung der Thematik fehlt. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle der Workflow eines PLS systematisch aufbereitet, und die jeweiligen Schritte von der Messwerterfassung hin zur Informationsextraktion sowie der Visualisierung werden für alle Beteiligte nachvollziehbar und transparent dargestellt. Ergebnis dieses Kapitels ist ein konzeptioneller Entwurf für eine Systemimplementierung nach allgemein anerkannten Grundsätzen. Zur zielgerichteten Konzeption ist es unerlässlich, das gesamte Monitoringsystem an sich als auch die Entscheidungsprozesse zu verstehen. Nur so ist es möglich, ein System für die entsprechende Monitoringaufgabe anbieten zu können. Hinsichtlich der Anwendung von PLS im Rahmen eines Frühwarnsystems müssen Fehlalarme und Missinterpretationen aufgrund von falsch ausgewählten Signifikanzniveaus oder systematischen Abweichungen vermieden werden. Zur Entwicklung des Workflows lässt sich in diesem Kapitel als Leitfaden die internationale Norm ISO 31000:2018 verwenden (Kap. 2.2). In Anlehnung an die Norm und transferiert auf das konkrete Beispiel von PLS kann zusammengefasst werden, dass auf Grundlage einer Risikobeurteilung (inkl. Risikoidentifikation, Risikoanalyse, Risikobewertung) und festgelegten Risikobehandlung zielgerichtet ein Monitoringsystem zu integrieren ist. Neben der ingenieurgeodätischen Überwachung selbst sind Ergebnisse an sich zu dokumentieren und mit den Stakeholdern in einer adäquaten Weise zu kommunizieren. Dies macht ein ganzheitliches Prozessverständnis und umfassendes methodisches Wissen unabdingbar. Zum ganzheitlichen Prozessverständnis gehört auch die Qualifizierung der erfassten Messdaten selbst. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier getätigten Betrachtungen eine rein ingenieurgeodätische Sichtweise beinhalten. Die Komplexität von PLS sorgt dafür, dass (systematische) Einflüsse oft unbekannt sind oder nur unzureichend modelliert werden können (Kap. 2.5). Für eine sachgerechte Bewertung und Angabe der Messunsicherheit hat sich daher der von der ISO herausgegebene GUM als akzeptierter Standard durchgesetzt (Kap. 2.2.3). Im Zuge dieser Arbeit wird PLS als einen Zyklus von vier miteinander interagierenden, thematisch abgrenzbaren Komponenten verstanden. In Abb. 4.1 lassen sich die Datenerfassung, das Datenmanagement, die Datenanalyse und schlussendlich die Visualisierung und das Reporting als vier separate Kernthemen eines PLS darstellen und werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels detailliert beschrieben.

- **Datenerfassung:** Zunächst gilt es, die relevanten Daten zu erfassen. Die Auswahlkriterien eines geeigneten Sensors basieren u.a. auf den Parametern der Reichweite, Strahldivergenz, Objektauflösung, der Messgenauigkeit oder aber auch der

IP-Klassifizierung, sodass ein Einsatz des Systems auch in rauen Umgebungen (bspw. im Bergbau oder im hochalpinen Bereich) möglich ist. Hinsichtlich der Messgenauigkeit ist festzuhalten, dass die Messergebnisse eines TLS verschiedenen zufälligen und systematischen Abweichungen unterliegen und damit das stochastische Modell festlegen (Kap. 2.5). Systematische Abweichungen lassen sich dabei in vier Kategorien unterteilen (Kap. 2.5). Die Beschreibung aller Einflussgrößen ist nicht das Thema dieser Arbeit. Bei PLS kommen meist Long Range Laserscanner mit Reichweiten von bis zu wenigen Kilometern zum Einsatz. Der Fokus liegt in dieser Arbeit deshalb auf einer sachgerechten Registrierung der jeweiligen Scandaten untereinander und der Bewertung systematischer Einflüsse auf die Messdaten in Form von geodätischer Refraktion.

(a) **Registrierung:** Methoden zur Analyse multitemporaler Punktwolken basieren auf der Annahme, dass alle Scans in einem gemeinsamen Referenzrahmen vorliegen. Daher müssen für die jeweiligen Scans Transformationsparameter vorliegen (Kap. 2.5.1). Fehlerhafte Resultate, die hier auftreten, haben unmittelbare und systematische Auswirkungen auf die Quantifizierung der Deformationen. Einflüsse der Registrierungsparameter werden in den Kapiteln 5.1 und 5.3 beschrieben.

(b) **Geodätische Refraktion:** PLS machen systematische Einflüsse sichtbar, die bei kampagnenweisen Messungen zu ausgewählten Zeitpunkten weniger dominant sind. In den nahezu kontinuierlichen Zeitreihen eines PLS werden zeitabhängige, systematische Fehlereinflüsse sichtbar, die negativ auf die Messergebnisse wirken. Die Ursachenforschung ist herausfordernd, da zeitabhängige Einflüsse in den Ergebnissen ähnlich aussehen, jedoch unterschiedliche Trigger haben können. Eine Trennung von äußeren Einflüssen und einer fehlerhaften Registrierung ist auf jeden Fall anzustreben. In Kapitel 5.1 wird der Einfluss von Wind auf die permanente Installation selbst diskutiert. Kapitel 5.3 zeigt die zeitliche Variabilität der Einflüsse geodätischer Refraktion und stellt Erfahrungswerte für mögliche Abweichungen im alpinen Umfeld vor.

- **Datenmanagement:** Das Datenmanagement selbst ist nicht Schwerpunkt dieser Arbeit. Da es allerdings elementarer Bestandteil eines umfassenden Monitoringsystems mittels PLS ist, wird die Thematik der Vollständigkeit halber an dieser Stelle dargelegt. Aufgrund der Anforderungen an ein qualitätsgesichertes Datenmanagement fällt für das hier präsentierte Konzept die Wahl auf den Scanner RIEGL VZ-2000i. Für die Integration werden frei zugängliche Datenschnittstellen angeboten, die es ermöglichen, den Scanner über eine selbst entwickelte Software zu steuern. Der Scanner kann zudem über Cloud-Konnektivität ferngesteuert werden und ermöglicht einen kontinuierlichen Datenstrom. Komprimierte sowie dokumentierte Datenformate - basierend auf der RDB (RIEGL Laser Scan Database) - erlauben die Adaption eigener Anwendungen an die Hardware. In Kapitel 6.1.1 wird ein Format in Anwendung vorgestellt. Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit ist kein weiterer Laserscanner bekannt, der ähnliche Funktionalitäten anbietet. Zusätzliches Ziel von PLS ist deren autonomer Betrieb. Besonders in abgelegenen Bereichen, wie bei einem Gletschermonitoring, müssen eine ununterbrochene Funktionalität sowie ständige Erreichbarkeit des Systems realisiert

werden. Daher wurde das System um eine Kommunikationsbox erweitert. Sie ermöglicht das Daten- als auch Energiemanagement des Systems. Die Box enthält einen Router, der über eine sichere VPN-Verbindung (Virtual Private Network) mit einem zentralen Auswerterechner in der Ferne verbunden ist. So ist gewährleistet, dass der Laserscanner vor unbefugtem Zugriff bestmöglich geschützt wird und nur einem ausgewählten Personenkreis zur Verfügung steht. Ein sog. *Watchdog* in der Kommunikationsbox überprüft automatisiert alle angeschlossenen Hardwarekomponenten auf ihre Funktion. Bei Unregelmäßigkeiten ist der *Watchdog* in der Lage, automatisch einen Neustart des Systems durchzuführen und den Systemadministrator über Anomalien zu informieren. Ein manueller Neustart des gesamten Systems ist ebenfalls möglich. Die Kommunikationsbox bietet außerdem die Möglichkeit, das System um eine redundante Datenspeicherung in Form eines NAS (Network Attached Storage) und eine Ersatzstromversorgung in Form einer USV (Unterbrechungsfreie Stromversorgung) beliebig - entsprechend der individuellen Anforderungen - zu erweitern.

- **Datenanalyse:** Aus den erfassten und zentral gemanagten Daten gilt es, wesentliche Informationen für die unterschiedlichen Stakeholder zu extrahieren. Was die wesentliche Information hierbei ist, wird von den verschiedenen Nutzern der Daten anders interpretiert. Aus Sicht der Ingenieurvermessung ist das primäre Ziel der geometrische Vergleich zweier Epochen und die Ableitung entsprechender Deformationsvektoren innerhalb eines klassischen bitemporalen Vergleichs. PLS erlaubt jedoch die Aufnahme von hochfrequenten Beobachtungsserien über lange Perioden. Die Extraktion diskreter Punkte, auf deren Grundlage Zeitreihen zu entwickeln sind, ist weiterhin herausfordernd und unterscheidet sich gegenüber dem bitemporalen Vergleich nicht. Bisher erlaubt uns der Vergleich zweier Epochen die Ableitung von Differenzen. Je nach Methode lassen sich diese Differenzen quantifizieren als auch qualifizieren. Es ist jedoch nur die Aussage gültig, dass zwischen den beiden ausgewählten Vergleichszeitpunkten eine Zustandsänderung vorliegt. Die Schlussfolgerung, welcher Veränderungsprozess (diskret oder kontinuierlich) einer bitemporalen Differenz zugrunde liegt, fehlt. Auswerteverfahren, die diesen Nachteil aufgreifen und auf die komplette Zeitserie zurückgreifen, wurden in den letzten Jahren zunehmend entwickelt und sind zentrales Thema dieser Arbeit (Kap. 6). Bei der Umsetzung der neuartigen Methoden liegt der Fokus zum einen (i) auf der Extraktion von Zeitreihen aus den Punktwolken und (ii) und der automatisierten Identifizierung von geomorphologischen Prozessen.

- **Visualisierung und Reporting:** In einem finalen Schritt sind die Messwerte bzw. die daraus ableitbaren Informationen in einer adäquaten Repräsentation den Stakeholdern zur Verfügung zu stellen. Ein zentrales Datenmanagement eröffnet die Möglichkeit, die Scandaten in einer webbasierten Monitoringplattform mit weiteren Sensordaten zusammenzufassen. Die Thematik wird in dieser Arbeit nicht detailliert bearbeitet, jedoch zur vollständigen Beschreibung des Systems präsentiert. Überwachungsdaten werden in einer Datenbank gesammelt, online visualisiert, analysiert und archiviert. Als integraler Bestandteil eines ganzheitlichen Risikomanagements ermöglicht ein solches System schnelle und fundierte Entscheidungen. Für eine erste Interpretation der Punktwolken kann bspw. auf eine von RIEGL entwickelte Monitoringanwendung zurückgegriffen werden. Die

Scandaten werden am Scanner in ein Rasterbild umgewandelt, sodass sich die Dateigröße auf nur noch etwa 10 % einer voll aufgelösten 3D-Punktwolke mit entsprechenden Metadaten reduziert. Im ersten Schritt müssen nur die Rasterdaten über das Internet übertragen werden. Solange keine vordefinierten Schwellwerte überschritten werden, müssen keine weiteren Daten übertragen werden. Das Datenformat wird in Kapitel 6.1.1 ausführlich beschrieben. Mit Hilfe solcher Tools wird das Erfordernis an eine nahe Echtzeitfähigkeit unterstützt.

Der konzeptionelle Entwurf orientiert sich an den Qualitätsmerkmalen für Informationen nach Tab. 2.2. Die Genauigkeit wird im Allgemeinen unmittelbar durch die Datenerfassung selbst und den eingesetzten Analysemethoden bestimmt. Der zweckmäßige Einsatz von Sensor und Auswertungsmethodik gibt die metrische als auch semantische Genauigkeit vor. Die Zuverlässigkeit des Systems wird durch ein zielgerichtetes Datenmanagement unterstützt. Verfügbare sowie aktuelle Daten sind ein wesentliches Kriterium. Die Integrität wird schlussendlich durch vollständige («alle notwendigen Daten für die Analyse sind vorhanden»), konsistente («die Daten werden bspw. in einem einheitlichen Koordinatensystem beschrieben») und korrekte Daten («Daten sind frei von groben und systematischen Messabweichungen») definiert. Basis für die Einhaltung der Integritätsmerkmale ist eine ordnungsgemäße Datenerfassung und deren Management.

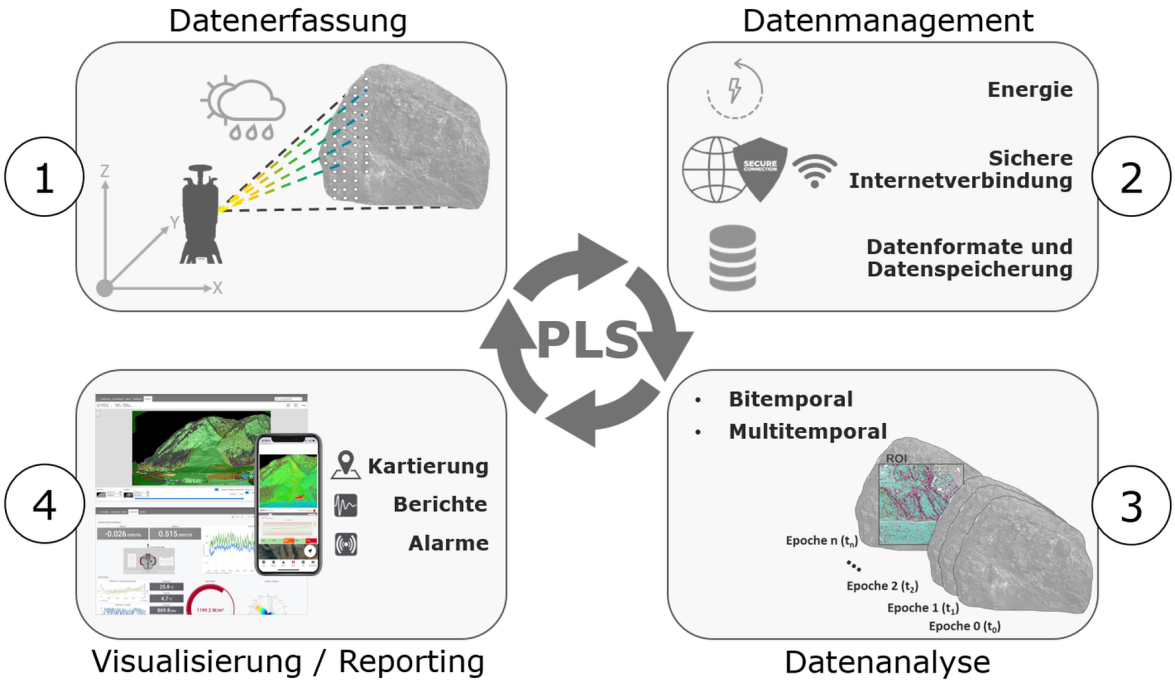


Abb. 4.1.: Konzept eines Arbeitsablaufs zur Integration von PLS in webbasierte Anwendungen.

5. Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Messergebnisse von permanent installierten terrestrischen Long Range Laserscannern

Durch den Einsatz von PLS werden Einflüsse auf die Messergebnisse sichtbar, die bei Messungen zu einzelnen ausgewählten Messzeitpunkten bisher nicht zu erkennen waren. Zeitabhängige, systematische Fehlereinflüsse treten in Zeitreihen von nahezu kontinuierlichen Messungen auf. In diesem Kapitel werden zwei Studien vorgestellt, bei denen PLS aus den unterschiedlichsten Gründen angewendet wurde. Eine erste Studie in den Niederlanden ist in der Weise konfiguriert, scheinbare Bewegungen infolge systematischer Störeinflüsse auf die Registrierung und die Laufzeit des sich ausbreitenden Laserstrahls in den multitemporalen Scans von der tatsächlichen Dynamik auf dem Strand und in den Dünen separieren zu können. Eine zweite Studie in Österreich hatte zum Ziel, die generelle Leistungsfähigkeit eines PLS zu testen und schlussendlich nachzuweisen. Unter dem Einfluss unterschiedlicher äußerer Messeinflüsse gilt es auch hier, die Einflussgrößen auf Registrierung und Atmosphäre zu zeigen. Im Sinne des GUM (Kap. 2.2.3) werden innerhalb dieses Kapitels Messunsicherheiten quantitativ ermittelt. Es handelt sich um eine Ermittlung nach TYP B, bei der der richtige Umgang mit systematischen Messabweichungen auf messtechnischen Kenntnissen und Erfahrungen über den Messprozess beruht.

5.1. Fallstudie I: Noordwijk / Niederlande[1]

Als Bestandteil der zwei Forschungsinitiativen CoastScan (Vos et al., 2017) und i²MON (Schröder & Klonowski, 2019) fand im Februar und März 2020 eine Feldstudie in Noordwijk / Niederlande statt. Bei der Auswertung dieses Datensatzes sowie eines weiteren Datensatzes, der an einem Strand in Kijkduin / Niederlande mit demselben Instrumentarium aufgezeichnet wurde (Vos et al., 2022), wurden mehrere systematische Abweichungen deutlich. Zu den Merkmalen der Einflüsse gehören ein Tag- und Nachtmuster, das offenbar mit der Temperatur korreliert (Anders et al., 2019) sowie radiale Streifen, die in einigen Scans an ebenen Oberflächen sichtbar werden (bspw. in Abb. 5.1 an einem Helikopterlandeplatz). Dieser Effekt tritt z. B. am 09.02.2020 in den Abendstunden auf. In Abbildung 5.1 werden zwei Scans (09:00 und 19:00 Uhr am 09.02.2020) mit einer Referenzebene verglichen. Als Referenz wurde die Aufnahme vom 09.02.2020 um 0:00 Uhr

[1] Unterkapitel basiert auf Kuschnerus et al. (2021b).

ausgewählt. Dies lässt vermuten, dass trotz eines angenommenen stabilen und unveränderten Instrumentariums (Vos et al., 2020) systematische Unterschiede zwischen den ausgewählten Punktwolken auftreten. Systematische Abweichungen können zu Fehlinterpretationen führen und Deformationen in den Punktwolken anzeigen, die in der Realität nicht vorhanden sind. Die systematische Abweichung kann nur dann in den Messdaten berücksichtigt werden, wenn die Ursache bekannt ist. Im vorliegenden Fall tritt das Muster zu bestimmten Zeitpunkten auf und ist damit eindeutig identifizierbar, sodass weitere Untersuchungen vereinfacht werden. Im Zuge dieses Experiments erfolgt eine qualitative Betrachtung der durch PLS gewonnenen Daten und eine Quantifizierung von systematischen Einflussgrößen. Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen daher zwei Fragestellungen: Was sind die Ursachen für die im PLS-Datensatz sichtbaren systematischen Fehlereinflüsse? Wie lassen sich diese Effekte abgrenzen und auf spezifische geometrische und umweltbedingte Einflüsse rückführen?

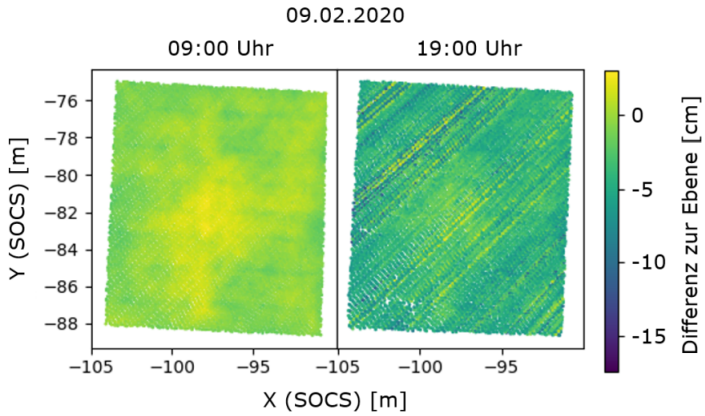


Abb. 5.1.: Darstellung der Residuen auf dem Hubschrauberlandeplatzes am 09.02.2020, um 09:00 (links) und um 19:00 Uhr (rechts).

Mit Hilfe des Versuchsaufbaus und des Datensatzes können die Auswirkungen auf die Datenqualität von multitemporalen Punktwolken für Überwachungsaufgaben untersucht werden. In Anlehnung an die Kategorisierung der systematischen Fehlereinflüsse in Kapitel 2.5 konzentriert man sich hier auf atmosphärische und umweltbedingte sowie metrologische Einflüsse, denn sie tragen jeweils zu den relativen Fehlern zwischen aufeinanderfolgend erfassten Punktwolken bei.

Bedingt durch die konstruktive Installation des Scanners an einem festen Metallrahmen, der wiederum mit dem Gebäude verbunden ist, wird angenommen, dass der Scanner seine feste Position beibehält und das SOCS eines jeden einzelnen Scans übereinstimmt. Im Idealfall bedeutet dies, dass keine weitere Registrierung des Datensatzes erforderlich ist. Allerdings können sowohl Umwelteinflüsse als auch eigene Tätigkeiten am Scanner selbst Auswirkungen auf die Messgeometrie verursachen. Zu den Umwelteinflüssen gehören Wind, der den Scanner bewegt, Regen, der die Sicht behindert, und die Temperatur, die durch die Ausdehnung des Materials, das zur Befestigung des Laserscanners verwendet wird, zu Verformungen führt.

5.1.1. Beschreibung der Daten

In dieser Studie werden Daten des Laserscanners RIEGL VZ-2000 verarbeitet, der seit Juli 2019 permanent auf dem Balkon des Grand Hotel Huis ter Duin in Noordwijk in

Betrieb ist. Der Strand und die Dünen werden alle 30 Minuten mit einem Laserscan erfasst (Abb. 5.2). Für das Messprogramm wurde eine Frequenz von 100 kHz und eine Winkelauflösung von 30 mdeg festgelegt. Die Strahldivergenz beträgt 0,30 mrad. Unter der Annahme eines orthogonalen Einfallswinkels entspricht dies einem Punktabstand von ca. 10 cm in einer Entfernung von 200 m und einer Größe des Footprints von etwa 5 cm. Aus dem PLS-Datensatz wurden zwei Zeiträume für die Analyse in dieser Arbeit ausgewählt: 08. bis 11.02.2020 und 20. bis 24.02.2020. In jedem der beiden Zeiträume gab es zwei Tage ohne starken Wind und jeweils einen Tag mit schwerem Sturm (Sturm «Ciara» am 09.02.2020 und Sturm «Yulia» am 22.02.2020). Die Auswahl wurde getroffen, um den Einfluss von Wind auf die Messergebnisse zu untersuchen. In jedem dieser Zeiträume wurde ein Scan pro Stunde aus dem Datenbestand für die weitere Analyse selektiert.

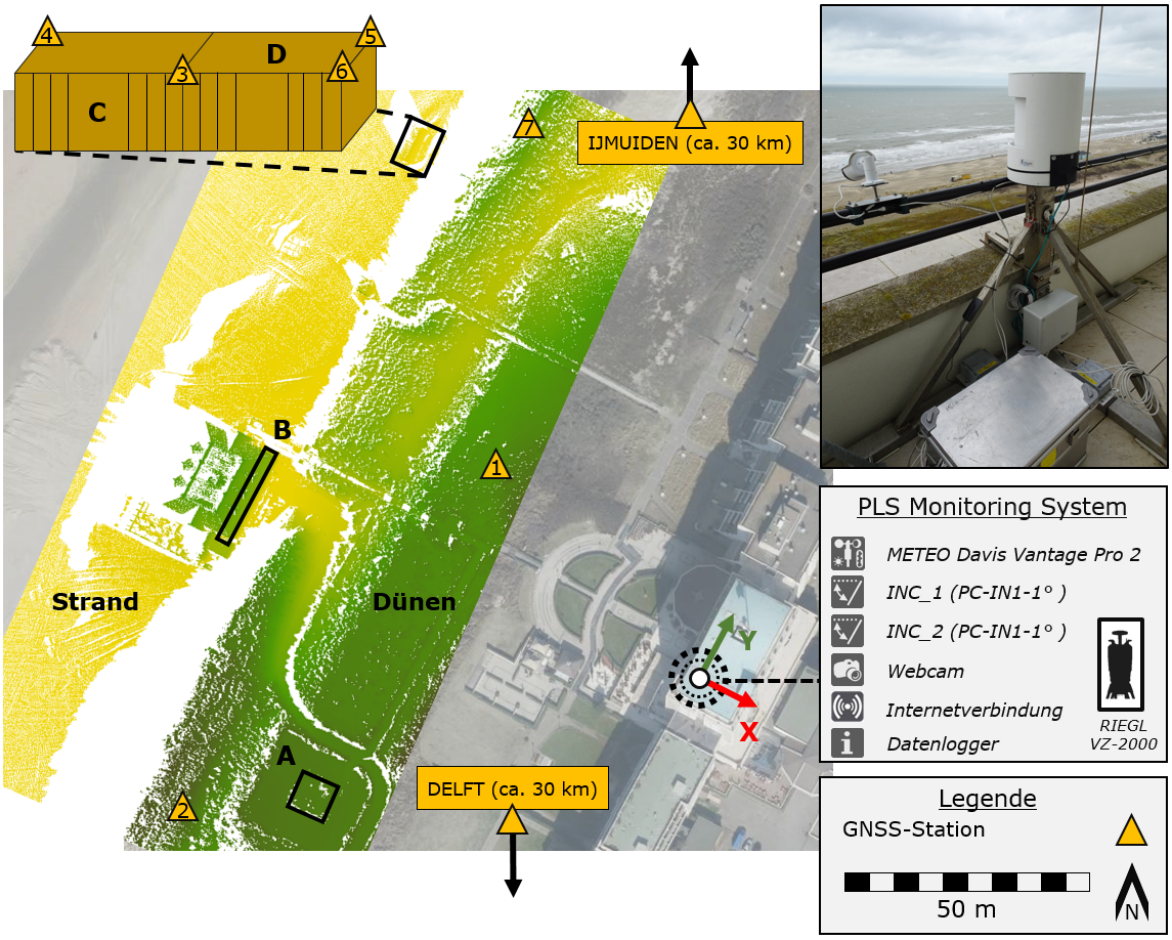


Abb. 5.2.: Räumliche Darstellung der Messkonfiguration in Noordwijk / NL. Punktwolke des Untersuchungsgebiets vom 20.02.2020, 01:00 Uhr mit den durch die Buchstaben A-D gekennzeichneten Referenzebenen (Tab 5.2) und Position der GNSS-Sensoren auf dem Containerdach und in den Dünen (1 - 7). Hintergrundbild: *PDOK.nl - «Luchtfoto 2022 Ortho 8cm RGB»*.

Zusätzlich zu den multitemporalen Scandaten kamen weitere Sensoren zum Einsatz. In Tabelle 5.1 sind alle Sensoren zusammengefasst. Die Analyse umfasst Daten von Neigungssensoren im Scanner selbst und zwei externen Inklinometern, die am Fuß der Befestigungskonsole des Laserscanners installiert waren. Des Weiteren war eine Wetterstation direkt neben dem Laserscanner installiert, und es wurden sieben GNSS-

Monitoringstationen im Bereich des Strands sowie der Dünen als auch GNSS-Daten aus dem niederländischen GNSS-Referenznetz (Stationen in IJmuiden und Delft) verwendet. Die Daten der internen Neigungssensoren waren während der gesamten Messperiode verfügbar. In der Zeit vom 21.02.2020 bis 18.03.2020 standen zusätzliche Daten der externen Neigungssensoren zur Verfügung, die am Metallrahmen der Scannerhalterung installiert waren. Abbildung 5.3 zeigt die Achsen der internen (Roll und Pitch) sowie externen Neigungssensoren (INC_1 und INC_2) in Relation zum SOCS des Laserscanners und dem globalen Koordinatensystem.

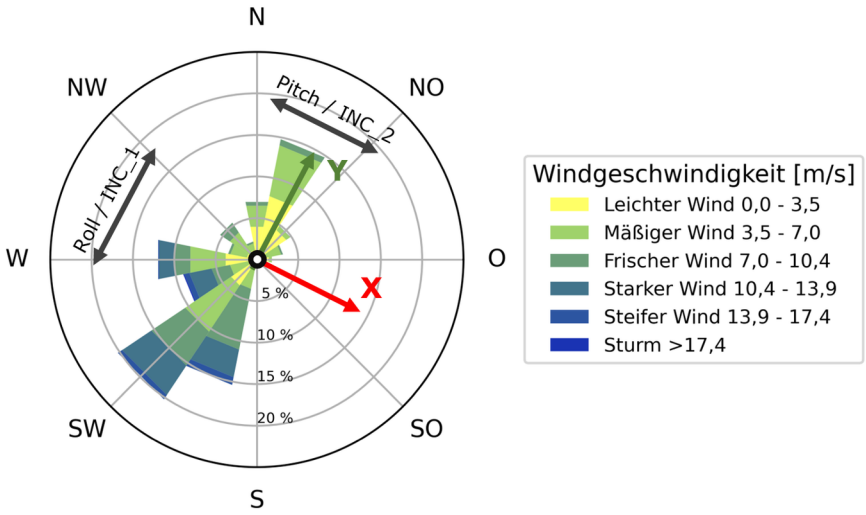


Abb. 5.3.: Relative Ausrichtung der Neigungssensoren in Bezug auf das SOCS des PLS im Zentrum der Grafik. Zusätzlich sind die Hauptwindrichtungen im Beobachtungszeitraum dargestellt.

Tab. 5.1.: Zusammenfassung der Datenbasis und der zugehörigen Sensorik in Noordwijk / NL.

Messdaten	**Sensor**	**Messfrequenz**
3D-Punktwolke	RIEGL VZ-2000	30 Minuten
Neigung Scanner	RIEGL VZ-2000 Interner Sensor	1 Hz während des Scans
Neigung Konsole	PC-IN1-1°	15 Sekunden
Temperatur Luftdruck Luftfeuchtigkeit Windgeschwindigkeit Windrichtung Niederschlag Taupunkt	Davis Vantage Pro 2	30 Minuten
GNSS Rohdaten Monitoringstation	DMT SAFEGUARD GNSS	10 Sekunden
GNSS Rohdaten Basisstation	Dutch Permanent GNSS	30 Sekunden

5.1.2. Methoden

Zur Ermittlung der Ursache des systematischen Effekts, welcher in Abbildung 5.1 dargestellt ist, wird eine Methode angewendet, die aus zwei Teilen besteht. Im ersten Abschnitt wird die Stabilität des Laserscanners überprüft. Dazu werden die internen und externen Neigungsdaten bezüglich periodischer und linearer Trends analysiert, sodass aussagekräftige Signale identifiziert werden können. In einem weiteren Schritt erfolgt die Analyse der Scandaten im Messgebiet. Zu diesem Zweck werden ausgewählte Referenzebenen analysiert und die zeitlichen Veränderungen im ausgewählten Zeitraum untersucht. Die auftretenden Bewegungen werden mit externen GNSS-Sensoren verglichen.

5.1.2.1. Stabilität des Laserscanners

An der Konsole zur Befestigung des Laserscanners wurden zwei externe Neigungssensoren rechtwinklig zueinander installiert. Beide Sensoren sind längs zur X- und Y-Achse des SOCS positioniert. Zusätzlich werden die Daten der internen Neigungssensoren des Laserscanners genutzt. Durch den Einsatz der Neigungssensoren werden zwei von sechs Freiheitsgraden in Bezug auf die Positionierung des Scanners erfasst und festgelegt. Die dreidimensionale Translation sowie die Orientierung um die Vertikalachse werden nicht extern ermittelt.

Zur Beschreibung der Scannerposition in Abhängigkeit von der Zeit werden zunächst alle Messdaten der internen und externen Neigungssensoren zwischen dem 08.02.2020 und dem 18.03.2020 für eine Analyse verwendet. Die externen Sensoren sind mit einer Genauigkeit von 0,0175 mm/m sensitiver für Bewegungen als die internen Sensoren mit einer Genauigkeit von 0,14 mm/m. Jede Messreihe (INC_1, INC_2, Roll und Pitch) wird zunächst auf signifikante periodische Merkmale mit Hilfe einer diskreten Fourier-Transformation untersucht. Das zeitdiskrete Signal wird in ein Frequenzspektrum überführt und die Tagesgangabhängigkeit der Neigungswerte wird verifiziert. Die Bestätigung des Tageszyklus dient als Eingangsgröße für eine Dekomposition der Zeitreihen. Die Zeitreihe wird in ihre Kernkomponenten zerlegt und als Summe von Trend, Periode und Residuen betrachtet. Dieses Verfahren liefert Rückschlüsse auf nieder- und hochfrequente Anteile in der Zeitreihe. Niederfrequenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine bestimmte Periode mindestens so lange dauert wie ein einzelner Scan. Der gesamte Scan wird beeinflusst, nicht jedoch einzelne Messpunkte innerhalb eines Scans im relativen Vergleich. Eine hohe Frequenz bedeutet dagegen eine Periode, die unterhalb der Scandauer liegt. Einzelne Scanlinien können dadurch individuell beeinträchtigt sein.

Die Daten der Neigungssensoren werden durch diese Dekomposition in zwei Parameter aufgeteilt. Die Daten werden zusammengefasst in 30-minütigen Segmenten. Das Ergebnis ist eine durchschnittliche Neigung, die den Trend oder die Periodizität darstellt, und eine Standardabweichung, die das Messrauschen bzw. hochfrequente Bewegungen der Neigungssensoren beschreibt. Direkt neben dem Laserscanner wurde eine Wetterstation angebracht, die alle 30 Minuten Temperatur, Niederschlag sowie Windgeschwindigkeit und -richtung registrierte. Die relevanten Parameter werden nachfolgend im Hinblick auf eine Korrelation mit Wetterdaten analysiert.

5.1.2.2. Einfluss auf die Punktwolke

Der nächste Schritt besteht darin, in den aufgezeichneten Daten der Punktwolke die Effekte zu identifizieren, die am Scanner selbst festgestellt wurden. Im Sichtbereich des Laserscanners werden drei Referenzobjekte ausgewählt, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind: Der asphaltierte Hubschrauberlandeplatz mit einem leichten Gefälle von ca. 1,4 cm pro Meter und einer Größe von 10,6 m × 11,7 m in 176 m Entfernung (Abb. 5.2 - A), eine vertikale Wand am Strandcafé, etwa 163 m vom Scanner entfernt und etwa 5 m^2 groß (Abb. 5.2 - B), sowie Referenzebenen an zwei Überseecontainern, die am Strand in etwa 206 m Entfernung vom Laserscanner aufgestellt wurden (Abb. 5.2 - C und D).

Tab. 5.2.: Zusammenfassung der Kennzahlen der Referenzebenen (Abb. 5.2).

Referenzebene	Größe [m^2]	Anz. Punkte	Entfernung [m]
A	124	9.000	176,3
B	5	720	162,5
C	28	480	206,1
D	27	2.100	206,6

Die Auswertung der Daten erfolgt durch die Ausgleichung von Ebenen in den ausgewählten Bereichen mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA). Dann werden die mittlere Z-Koordinate des Hubschrauberlandeplatzes (Abb. 5.2 - A), die mittlere X-Koordinate der vertikalen Wand am Café (Abb. 5.2 - B) sowie die mittleren Koordinaten und die Normalenvektoren an den Containern mit den zugehörigen Residuen der Ebenenausgleichung extrahiert. Der quadratische Mittelwert (RMS) der Residuen aus den Ebenenanalysen ist ein Hinweis auf qualitativ schwächere Scans.

Mithilfe der Korrelation zwischen den Neigungswerten des Scanners und den Wetterdaten lässt sich eine mögliche Ursache ableiten. Die gemittelten Koordinaten geben einen Hinweis auf die relative Position der Referenzgeometrie in Bezug auf den Referenzrahmen, in dem die Messdaten koordiniert sind. Abweichungen geben Hinweise auf die langfristige Stabilität und Orientierung des Laserscanners. Die Abweichungen werden wiederum mit den Daten des internen und externen Neigungssensors verglichen. Während der Messkampagne wurden sieben GNSS-Empfänger im Bereich der Dünen und auf den Containern am Strand installiert (Abb. 5.2 - 1 bis 7). Für die Auswertung wird der GNSS-Basislinienprozessor «Wa2» verwendet (Wa2, 2021). Sowohl die Verschiebung als auch die Stabilität der Container wird anhand der GNSS-Messungen überprüft. Die GNSS-Messungen werden streng nach dem Prinzip der Basislinien prozessiert. Für die absolute Positionierung sind zwei Referenzstationen des Dutch Permanent GNSS Array (DPGA) in IJmuiden und Delft maßgeblich. Die lokalen Referenzstationen (Abb. 5.2 - 1, 2 und 7), deren Positionen während dieses Experiments stabil sind, bestimmen die Koordinaten der Objektpunkte auf dem Container (Abb. 5.2 - 3 bis 6). Dadurch werden 3D-Koordinaten mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern erhalten.

5.1.3. Resultate

Die Resultate der Studie werden in vier Teilbereichen vorgestellt: Zunächst werden die Neigungssensoren des Scanners ausgewertet (i) und die gemessenen Werte mit den Wetterdaten korreliert (ii). Nachfolgend werden die Ergebnisse mit Einflüssen in den Punktwolkendaten in Relation gesetzt (iii) und mit unabhängigen GNSS-Messungen validiert (iv).

5.1.3.1. Auswertung der Neigungssensoren

Zunächst wird die Stabilität der Scannerposition mit Hilfe der externen und internen Neigungssensoren überprüft. Die maximale Abweichung der Daten beträgt in den meisten Fällen bis zu ± 20 mm/m (gelegentlich bis zu ± 80 mm/m) für die internen Sensoren und ± 0,1 mm/m für die externen Sensoren. Dies deutet darauf hin, dass der Scanner grundsätzlich stabil mit dem Hotel verbunden ist. Bezüglich der Maximalwerte ist keine nennenswerte Bewegung feststellbar, die am Sockel der Halterung gemessen wird. Kritisch betrachtet, entspricht der Wert von ± 0,1 mm/m einer Abweichung von 20 mm in der gemessenen Z-Koordinate bei 200 m Entfernung. Dieser Wert liegt innerhalb der Messgenauigkeit sowie der räumlichen Auflösung des Scanners. Mittels einer diskreten Fourier-Transformation der externen Neigungsdaten wird ein dominantes Signal im Frequenzspektrum bei einer Periode von 24,5 Stunden registriert. Danach erfolgt eine Extraktion der Hauptkomponenten des Signals in Trend, Periode und Rauschen, die zu den in Tabelle 5.3 zusammengefassten Ergebnissen führt.

Tab. 5.3.: Trend, Periode und Residuen der jeweiligen Signale der Neigungsmessung. INC_1 und INC_2 beziehen sich auf die externen Neigungssensoren. Roll und Pitch auf die internen Neigungssensoren. Alle Werte in mm/m. Die Maximalwerte sind grau hervorgehoben.

	Trend			**Periode**		**Residuen**		
	Min	Max	∅	Min	Max	Min	Max	∅
INC_1	-0,058	0,054	0,002	-0,018	0,016	-0,108	0,104	0,016
INC_2	-0,110	0,080	0,000	-0,023	0,017	-0,185	0,226	0,033
Roll	-0,223	0,112	-0,008	-	-	-33,185	28,666	1,016
Pitch	-0,151	0,346	-0,007	-	-	-55,670	71,644	1,645

Trend und Periodizität haben einen niederfrequenten Charakter und beeinflussen die Messdaten innerhalb eines Scans nicht. Der Einfluss von Trend und Periode auf die Punktwolkendaten kann in Form einer 6-Parameter-Transformation korrigiert werden. Die Periodendauer, die mit den externen Sensoren erfasst wird, ist in den Daten der internen Sensoren nicht enthalten. Das Messrauschen überlagert das periodische Signal. Das verbleibende Signal umfasst die Ungenauigkeiten der Messsysteme, aber auch Signale, die nicht durch Trend und Periode modelliert werden können. Das ist ein Hinweis auf hochfrequente Bewegungen des Scanners und beeinflusst somit die Daten innerhalb eines Scans. Dabei ist festzustellen, dass die erhöhten Restwerte mit den Sturmereignissen übereinstimmen (Abb. 5.4). Die Daten der externen Sensoren zeigen kaum signifikante Messwerte an. Wenige Ausnahmen fallen mit den Sturmereignissen zusammen. Die Werte belegen, dass der Scanner ausreichend stabilisiert und verankert ist. Das verbleibende Signal der internen Sensoren weist ein höheres Rauschen auf (Tab.

5.3, blau markiert), das nicht allein durch die Messgenauigkeit erklärt werden kann. Visuell korrelieren die Werte mit zunehmender Windgeschwindigkeit (Abb. 5.4), was zum folgenden Schritt in der Analyse führt.

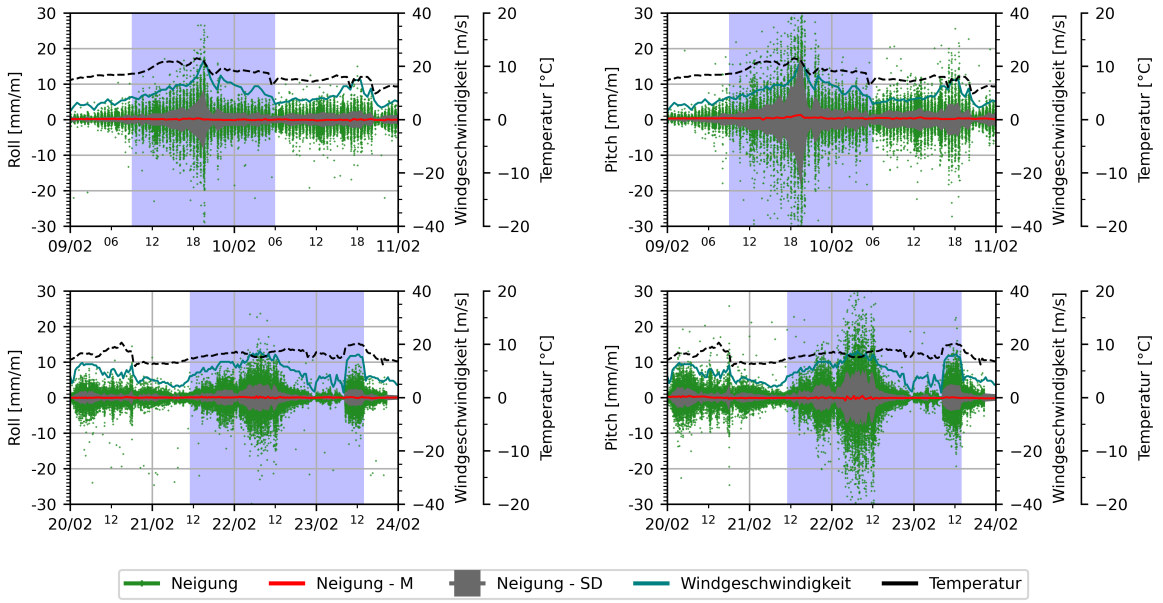


Abb. 5.4.: Messwerte der internen Inklinometer im Zeitraum von Sturm «Ciara» (Oben) und den Sturm «Yulia» (Unten). Die Zeiträume der Stürme sind blau markiert. Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der Neigungsdaten werden mit Temperatur und Windgeschwindigkeit verglichen.

5.1.3.2. Korrelation mit den Wetterdaten

In diesem Teil der Analyse liegt der Schwerpunkt auf den beiden ausgewählten Zeiträumen von vier Tagen. Zunächst werden die Daten zu Blöcken von jeweils 30 Minuten zusammengefasst und ein Mittelwert für jeden Block berechnet. Durch Mittelung wird hochfrequentes Rauschen minimiert und der Wert wird mit den Temperatur- und Winddaten als Parameter für periodisches und trendbezogenes Verhalten in Beziehung gesetzt. Neben dem Mittelwert wird für jeden Block eine Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung ist ein Indikator für die statistische Verteilung der einzelnen Messwerte und beschreibt somit die Bewegung des Sensors innerhalb eines Blocks, wodurch eine hochfrequente Kenngröße nachgewiesen werden kann. Die Werte werden grafisch dargestellt und Korrelationsanalysen werden durchgeführt, um die Abhängigkeit von den meteorologischen Daten zu untersuchen. Abbildung 5.4 zeigt die Mittelwerte von Pitch und Roll mit ihren Standardabweichungen zusammen mit den Wind- und Temperaturdaten während der beiden Stürme. Die sichtbar hohen Standardabweichungen der Neigungswerte fallen mit den Spitzenwerten der Windgeschwindigkeit bei beiden Stürmen zusammen.

Die Korrelationsanalyse (Tab. 5.4) bestätigt die Annahme, dass die Wind- und Sturmereignisse die Ursache für die Abweichungen in den Scans sind. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson wurde jeweils für die Mittelwerte und die Standardabweichungen

Tab. 5.4.: Pearson-Korrelationskoeffizient der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der internen und externen Neigungswerte mit der Temperatur bzw. der Windgeschwindigkeit. Die signifikanten Korrelationswerte sind grau markiert.

		Temperatur	**Windgeschwindigkeit**
Roll	M	0,03	0,05
	SD	0,17	0,51
Pitch	M	0,12	-0,01
	SD	0,23	0,71
INC_1	M	0,80	0,33
	SD	0,25	0,72
INC_2	M	-0,41	-0,19
	SD	0,25	0,61

der Neigungswerte aus beiden Sensoren mit der Temperatur und der Windgeschwindigkeit berechnet. Die Windgeschwindigkeit korreliert mit der Standardabweichung der Neigungswerte zwischen 0,51 (Roll, interner Sensor) und 0,72 (INC_1, externer Sensor), und der Mittelwert von «INC_1» korreliert mit der Temperatur mit 0,8. Wichtig ist, dass es sich hierbei um relative Werte handelt und aus den Korrelationen keine absoluten Bewegungsgrößen abgeleitet werden können. Im hochfrequenten Bereich zeigt sich für alle Neigungssensoren eine hohe Korrelation mit der Windgeschwindigkeit. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass die Sturmereignisse Ursache für die beschriebenen systematischen Abweichungen in den Scandaten sind. Die externe Neigungssensorik ist sensitiv genug, um temperaturbedingte Veränderungen der Scannerposition zu erkennen. Die dominierende Periodendauer von 24,5 Stunden signalisiert eine temperaturabhängige tägliche Schwankung. Zur Verifizierung dieser Erkenntnisse und deren Verknüpfung mit den Auswirkungen auf die Punktwolken werden im folgenden Unterkapitel die Einflüsse diskutiert.

5.1.3.3. Qualitative Analyse der Punktwolken

Die Analyse der Scans erfolgt an ausgewählten Bereichen mittels der Ausgleichung von Referenzebenen (Tab. 5.2). Für den Vergleich wird eine mittlere Hauptorientierung (z.B. im Fall des Hubschrauberlandeplatzes in Z-Richtung) und der RMS der Residuen berechnet. Der Mittelwert der Z- (Hubschrauberlandeplatz) sowie der X-Koordinate (vertikale Ebenen) ist ein Indikator für den niederfrequenten Bestandteil und die Residuen sind der Indikator für die hochfrequenten Anteile. Große Verschiebungen, aber auch kleinere Variationen in der Position des Laserscanners erscheinen ebenfalls in den Punktwolken. In der ersten Messperiode ist ein sprunghafter Anstieg der Abweichung (ca. 5 cm) mit dem Einsetzen des Sturms Ciara am 09.02.2020 zu sehen. Eine zweite, durch eigene Wartungsarbeiten am 20.02.2020 gegen 12:00 Uhr verursachte Verschiebung führt zu einer Abweichung des Hubschrauberlandeplatzes in den Scandaten um etwa 4 cm in Z-Richtung (Abb. 5.5) und der vertikalen Wand am Strandcafé um etwa 2 cm in X-Richtung. Diese Veränderungen können durch die Bestimmung von Transformationsmatrizen kompensiert werden, welche eine rigide Transformation der Punktwolke beschreiben. Solche Transformationen werden mit Hilfe von sechs Para-

metern beschrieben (Kap. 2.5.1, Gl. 2.5). Eine Translation in X-, Y- und Z-Richtung und je eine Rotation um die drei Achsen. Für diese Abschätzung wird der in RiSCAN PRO (V2.11) implementierte ICP-Algorithmus verwendet (Gaisecker et al., 2012). Nach Durchführung der rigiden Transformation wird die verbleibende hochfrequente Abweichung des Scanners weiter analysiert und mit den Daten der Wetterstation verglichen. Bei ruhigen Wetterbedingungen zeigen die Neigungssensoren Standardabweichungen von weniger als 1 mm/m sowohl bei Pitch als auch Roll. Bei Windgeschwindigkeiten um 10 m/s und mehr erreichen die Standardabweichungen von Pitch und Roll Werte über 5 mm/m bzw. 3 mm/m. Dies zeigt, dass der Scanner während der Datenerfassung in Bewegung ist. Die Auswirkungen sind in den ausgewählten Bereichen der Punktwolke als radiale Streifen zu erkennen (Abb. 5.1). Um diesen Effekt zu quantifizieren, werden die Residuen von ausgeglichenen Ebenen am Hubschrauberlandeplatz und am Café verglichen. Die Residuen an den beiden Referenzflächen summieren sich bis zu einem Wert von etwa 20 mm/m zum Höhepunkt des Sturms.

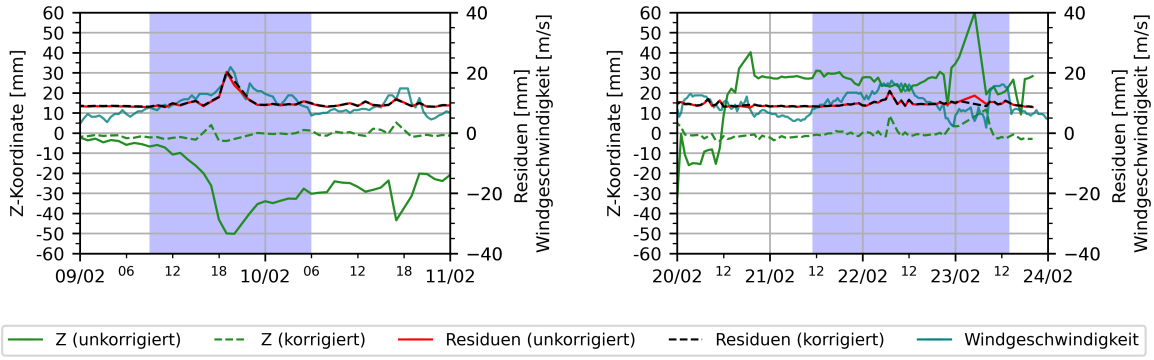


Abb. 5.5.: Berechnung der Ebene am Hubschrauberlandeplatz und Vergleich der Parameter mit den Wetterdaten während der Stürme «Ciara» (links) und «Yulia» (rechts). Die Zeiträume der Stürme sind blau markiert. Der Sprung in der mittleren Z-Koordinate des Hubschrauberlandeplatzes um die Mittagszeit am 20.02.2020 wurde durch Wartungsarbeiten verursacht.

5.1.3.4. Verknüpfung mit den GNSS-Daten

Um die Stabilität des Laserscanners durch eine unabhängige Messung zu untersuchen, wurden Einfrequenz-GNSS-Empfänger verwendet. Drei Referenzstationen in den Dünen wurden zusammen mit zwei weiteren Referenzstationen im DPGA (IJmuiden und Delft) ausgewertet. Die GNSS-Rohdaten werden in diesem Netz mit einer Frequenz von 30 Sekunden aufgezeichnet und zu Koordinatenlösungen von 1, 3, 6, 12 und 24 Stunden kombiniert. Während des Beobachtungszeitraums sind keine nennenswerten Bewegungen zu erkennen. Die Messergebnisse können mit einer 3D-Genauigkeit von 2,6 cm bestimmt werden. Aufgrund der nachgewiesenen Stabilität können diese Stationen wiederum als Basisstationen für die GNSS-Berechnungen auf den Containern verwendet werden. Aufgrund der kurzen Basislinien zu den Stationen in den Dünen werden die Koordinaten auf dem Container mit einer 3D-Genauigkeit von 5 mm berechnet. Aus den vier GNSS-Koordinaten und den ausgewählten Punkten der Scandaten werden je zwei Ebenen geschätzt. Die Parameter der Ebenenschätzung werden als Vergleichsmaßstab für die beiden Messsysteme verwendet. Die Laserscans sind nicht in einem globalen Koordinatensystem referenziert, sodass ein absoluter Vergleich mit den

GNSS-Daten nicht möglich ist. Ein relativer Vergleich der Veränderungen in den Ebenen ist jedoch möglich. In Abbildung 5.6 wird die erste GNSS-Messung am 21.02.2020 als Referenz genommen und die Veränderung eines vertikalen Winkels berücksichtigt. In den Daten des Laserscanners ist ein höheres Messrauschen zu erkennen, was auf die geringere Messgenauigkeit hindeutet. Für den Vergleich wird für jeden Datensatz eine lineare Regression (Abb. 5.6 - Regr.) durchgeführt. Der abwärts gerichtete Trend zeigt, dass sich der Container während der beiden Sturmtage zum GNSS-Punkt 4 hin neigt. Der Versatz zwischen den Graphen zeigt an, dass die jeweiligen Koordinatensysteme der Sensoren nicht identisch sind. Die Z-Koordinate des PLS ist zudem nicht senkrecht, da der Scanner nicht horizontiert ist. Die untransformierten Daten zeigen einen stärkere negative Steigung, die durch die niederfrequente rigide Bewegung verursacht wird. Nach der Starrkörpertransformation bleibt zwar der Versatz aufgrund der unterschiedlichen Koordinatensysteme bestehen, aber die relative Änderung ist zwischen PLS und GNSS identisch.

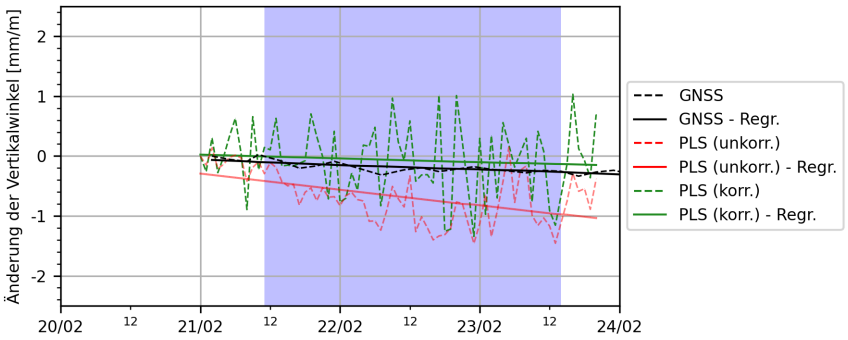


Abb. 5.6.: Vertikalwinkeländerung zwischen Container und der Horizontalen: Vergleich der Ebenenmodellierung aus unkorrigierten (unkorr.), korrigierten (korr.) PLS-Daten und den vier GNSS Antennen. Die Zeitraum von Sturm «Yulia» ist blau markiert.

5.1.4. Zusammenfassung und Diskussion

Äußere Einflüsse wirken sich deutlich auf die Datenqualität von PLS-Daten aus. Der überwiegende Anteil der systematischen Einflüsse (z. B. Verschiebung der Scannerposition, Ausbreitung des Lasers oder Wechselwirkung mit dem Messobjekt) ist zeitabhängig, hat einen Tagesgang oder ist temperaturabhängig. Daher sind Korrelationen zwischen den einzelnen Messgrößen nur bedingt aussagekräftig. Eine hohe Korrelation deutet nicht zwangsläufig auf einen kausalen Zusammenhang. Doch im Zusammenspiel mit mehreren Datenquellen und Methoden lassen sich die entsprechenden Relationen mit einer hohen Verlässlichkeit ermitteln.

Die Auswertung der externen und internen Neigungssensoren zeigen, dass eine Verschlechterung der Datenqualität zu beobachten ist, wenn die Standardabweichung der Neigungsdaten während eines Scans höher ist als 4 mm/m. Solche Ereignisse führen zu Residuen mit einer Magnitude von mehreren Zentimetern an den Referenzflächen. Es wird angenommen, dass der Effekt, der als Summe der Residuen auf den Referenzflächen quantifiziert wird, in der gesamten Punktwolke vorhanden ist. Auf rauen und dynamischeren Oberflächen ist der Effekt jedoch weniger sichtbar. Dies führt dazu, dass die Werte in Z-Richtung weniger genau sind. Die externen Neigungssensoren zeigen zudem temperaturbedingte periodische Signale in der Neigung des Laserscanners.

Allerdings haben sie keine signifikanten Auswirkungen auf die Punktwolken im vorliegenden Datensatz. Die Auswirkungen der beobachteten hochfrequenten Bewegungen im Zusammenhang mit der Datenqualität der Punktwolken sind in dieser Fallstudie mit extremen Wetterereignissen (oder Wartungsarbeiten) verbunden. Ist der Laserscanner starken Winden mit Geschwindigkeiten von 10 m/s und mehr ausgesetzt, nehmen die Standardabweichungen der Neigungswerte zu und die Datenqualität in der Punktwolke sinkt. Der Versuchsaufbau mit einer Wetterstation direkt neben dem Laserscanner ermöglicht die Verknüpfung dieser Ereignisse. Die hohe Korrelation und weiterführende Untersuchungen lassen den Schluss auf einen kausalen Zusammenhang zu.

Die Bewegung des Laserscanners, die mit den externen und internen Neigungssensoren erfasst wird, führt zu einem Versatz in den multitemporalen Punktwolken. Dieser Versatz kann mit Hilfe von Starrkörpertransformationen korrigiert werden, die aus den Daten selbst oder aus den gemessenen Neigungswinkeln abgeleitet werden. Methoden zur Berechnung dieser Transformationen sind in Kapitel 2.5.1 diskutiert. Die radialen Streifen, die zu einer hohen Summe der Residuen auf den Referenzebenen führen, sind als Folge der hochfrequenten Bewegung des Scanners wesentlich anspruchsvoller zu korrigieren.

Die Analyse der GNSS-Sensoren an einem Referenzobjekt wie dem Schiffscontainer zeigt, dass GNSS-Daten in einem bestimmten Umfang als Validierungsdaten verwendet werden können. Die Genauigkeit der GNSS-Messungen in der Größenordnung von wenigen Millimetern ermöglicht die Überprüfung von allgemeinen Trends, wie z. B. die Stabilität einer Konstruktion oder die Bewegung eines (Referenz-)Objekts in eine bestimmte Richtung. Es wird empfohlen, wo immer es möglich ist, ein zusätzliches Messverfahren, wie z. B. GNSS oder Neigungssensorik, zu verwenden, um unabhängige Resultate zu erhalten.

5.2. Fallstudie II: Detektion von Corner Cube Prismen und deren Genauigkeit

In Kapitel 2.5.3 wird beschrieben, dass trotz der Vielzahl an Messpunkten, die mittels TLS in einer Szene erfasst werden, einzelne Punkte zwischen zwei Messungen nicht als ident anzusehen sind. Klassische Auswerte- und Analysemethoden aus dem Bereich der Geodäsie basieren jedoch zumeist auf Punktkorrespondenzen, die sich beim TLS zum einen aus den Daten selbst ableiten lassen (Kap. 2.5.3) oder mit Hilfe künstlicher Zielzeichen realisiert werden (Kap. 2.5.1.1). Bei der Anwendung von TLS haben sich unter anderem Black-White-Targets oder retroreflektierende Marker als künstliche Zielzeichen etabliert. Neben den in Kapitel 2.5.1.1 beschriebenen Nachteilen kommt hinzu, dass bei Messungen über große Distanzen solche Zielzeichen proportional mit der Strahldivergenz über die Entfernung größer werden müssen, um eine zuverlässige Detektion zu ermöglichen. Dieser Nachteil kann durch eine Weiterentwicklung des Laserscanner-Herstellers RIEGL aufgewogen werden. Die Entwicklung betrifft die Detektion von Corner Cube Prismen.

5.2.1. Prismendetektion aus Daten eines TLS

Die Energie eines von einem Prisma zurückgesendeten Laserimpuls ist prinzipiell zu hoch, sodass die Empfängerdiode am Laserscanner Schaden nehmen kann. Daher wurde von RIEGL ein Messprogramm für den Laserscanner entwickelt, dass in einem ersten Schritt Prismen in einem Scan ab einer Entfernung von 200 m detektiert und in einem weiteren Schritt mittels angepasster Sendeleistung in einer zweiten Aufnahme hochauflösend erfasst. Diese Funktion bietet ein breites Spektrum an Anwendungen und Vorteilen. Einerseits sind Prismen aufgrund ihrer kompakten Bauweise einfach im Objektraum zu installieren und unempfindlicher gegenüber Umwelteinflüssen als bspw. Black-White-Targets. Andererseits entfällt durch die radiometrische Wechselwirkung mit dem Laserscanner die Notwendigkeit, Corner Cube Prismen proportional zur Messentfernung zu dimensionieren.

Für die erste Stufe des Prozesses wird die in Kapitel 2.3 beschriebene Mehrzielauflösung eines Laserimpulses genutzt. In Verbindung damit, dass ein Prisma dem Algorithmus als Modell hinterlegt werden kann, funktioniert die Detektion auch unter herausfordernden Messumgebungen. Im Zuge dieser Arbeit kommen durchweg die Prismen «LEICA GPR1 bzw. GPR121» zur Anwendung, weshalb die beiden Modellparameter: Durchmesser = 62,5 mm und Prismenkonstante = -34,4 mm angewendet werden. In der zweiten Stufe wird ein hochauflösender Scan im Umfeld eines Prismas analysiert und ausgewertet. Auf Grundlage der Reflektivität der Messungen werden zwei Schwellenwerte berechnet - «Cut low» und «Cut high». Alle Punkte mit einer Reflektivität über «Cut high» sind Teil des Prismenzentrums (Abb. 5.7 - Oben Mitte / Unten (roter Bereich)). Die übrigen Messpunkte mit einer Reflektivität zwischen «Cut low» und «Cut high» gehören zur Umgebung des Prismas (Abb. 5.7 - Oben Rechts / Unten (blauer Bereich)). Für die Berechnung des dreidimensionalen Mittelpunkts eines Prismas werden sowohl der Kern als auch die Umgebung verwendet. Für den Kern selbst wird der Schwerpunkt berechnet. Durch die Umgebung wird wiederum eine Ebene geschätzt. Der berechnete Schwerpunkt wird auf die Ebene projiziert. Der Kern wird somit zur Bestimmung der Position (Abb. 2.5 - φ_i, ϑ_i) und die Umgebung zur Schätzung der Entfernung (Abb. 2.5 - s_i) verwendet. Der hier beschriebene Prozess ist zusammenfassend in Gaisecker und Schröder (2022) dargestellt und beruht des Weiteren auf einer Korrespondenz mit dem Hersteller. Die neue Funktionalität bietet die Möglichkeit, in Scans mit hohen Reichweiten idente Punkte unter sinnvollen Rahmenbedingungen zu detektieren. Speziell für die Zielsetzung dieser Arbeit lassen sich - basierend auf diesen Punkten - wertvolle Analysen hinsichtlich der Beschreibung des Systemverhaltens unter bestimmten Gegebenheiten auf Basis etablierter Methoden durchführen.

5.2.2. Genauigkeitsanalyse der Prismendetektion

5.2.2.1. Datenbeschreibung und Methodik

Da es sich um eine neuartige Methode zur Punktidentifikation innerhalb von Punktwolken handelt, sind bisher keine Erfahrungswerte hinsichtlich der zu erreichbaren Genauigkeit vorhanden. Deshalb werden in diesem Kapitel Genauigkeiten für die Detektion von Corner Cube Prismen ermittelt. Nach Woschitz und Heister (2017) haben das Überprüfen und Kalibrieren von Messinstrumenten eine lange Tradition in der Geo-

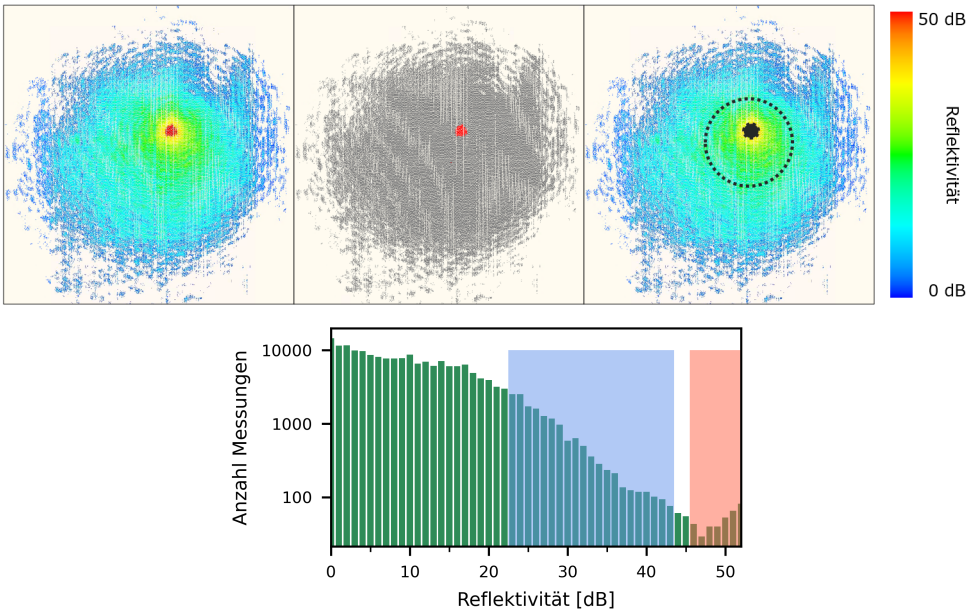


Abb. 5.7.: Detektion von Corner Cube Prismen aus den hochauflösenden Scandaten. Oben Links: Prismenscan eingefärbt nach der Reflektivität. Oben Mitte: Darstellung der Punkte oberhalb von «Cut high». Oben Rechts: Darstellung der Punkte zwischen «Cut low» und «Cut high». Unten: Darstellung der Reflektivitäten eines Prismenscans als Histogramm. Im blauen Bereich liegen die Werte zwischen «Cut low» und «Cut high». Im roten Bereich liegen die Werte oberhalb von «Cut high».

däsie. Es werden vielzählige Methoden zur Überprüfung einzelner Komponenten an Messinstrumenten oder kompletter Systeme angeboten. Allerdings ist auch hier der unaufhaltsame Trend zu automatisierten, mikroprozessorgesteuerten Messgeräten bis hin zu vollautomatischen «black boxes» und der vermehrte Einsatz dieser Multisensorsysteme ersichtlich, was eine Adaption von Prüfverfahren notwendig macht (Woschitz & Heister, 2017). Die beiden Autoren führen weiter aus, dass in den meisten Fällen die existierenden Prüfmethoden kaum noch die Anforderungen erfüllen, modernes Instrumentarium auf Funktionstüchtigkeit, Zuverlässigkeit und Richtigkeit durchgreifend zu kontrollieren. TLS basiert zwar auf dem Messprinzip eines Tachymeters (Kap. 2.3), aber als Messergebnis werden grundsätzlich Koordinaten - bezogen auf das SOCS - geliefert. Woschitz und Heister (2017) führen aus, dass es nicht mehr sinnvoll ist, einzelne Komponenten im Messprozess zu untersuchen. Die Genauigkeit eines 3D-Punktes wird von vielen Faktoren beeinflusst, weshalb nur eine Systemprüfung verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse als Summe eines komplexen Messprozesses liefern kann (Gottwald et al., 2009). Mit Hilfe geeigneter Testfelder können mittels eines Soll-Ist-Vergleichs mit bekannten Referenzgrößen Genauigkeiten ermittelt werden. Nach Gottwald et al. (2009) sind Fehlerursachen und Einflüsse einzelner Komponenten dagegen nur exemplarisch und mit viel Aufwand zu bestimmen – weshalb eine tiefergehende Genauigkeitsschätzung einzelner Komponenten in dieser Arbeit ausbleibt.

Ziel dieses Kapitels ist die Prüfung eines Systems als Ganzes, bestehend aus einem TLS (RIEGL VZ-2000i) in messtechnischer Interaktion mit einem Prisma (LEICA GPR121), der Algorithmik, die schlussendlich die Koordinate des Prismenzentrums berechnet und der im Messprozess inkludierten möglichen Fehlereinflüsse (Kap. 2.5). Das Ergebnis der Prüfung ist eine Genauigkeitsangabe, die die Komponenten der Strecken- und Winkelmessung bestmöglich beschreibt. Zusätzlich ist es erforderlich die Genauig-

keitsmaße unter realistischen Bedingungen in einem Messraum zu bestimmen, der die Reichweite eines Long Range Laserscanners abdeckt.

Als Referenzgeometrie bietet sich die Kalibrierbasis in Unna-Hemmerde (Nordrhein-Westfalen) an. Die Basis besteht aus acht Messpfeilern (wovon sechs benutzt wurden), die stabil im Erdreich gegründet sind und einer linienhaften Anordnung folgen. Die maximale Länge zwischen den äußeren Pfeilern beträgt ca. 1.200 m und die Abstände der dazwischenliegenden Pfeiler variieren, sodass verschiedene Kombinationen an Solllängen entstehen (Tab. 5.5). Die Pfeiler sind mit einer Pfeilerkopfplatte und 5/8"-Gewinde ausgestattet, die eine Installation von Messinstrumenten als auch von Vermessungsprismen erlaubt. Zwischen den Messpfeilern sind horizontale Sollstrecken mit übergeordneter Genauigkeit bestimmt und liegen der Kalibrierbasis zugrunde. Optimiert ist diese Konfiguration jedoch für die Überprüfung der EDM-Komponente (elektronische Distanzmessung). Eine solche Überprüfung macht bspw. den Aufbau eines Tachymeters auf den Pfeilern selbst notwendig und die Anzielung von Prismen in verschiedenen Kombinationen (Joeckel et al., 2008).

Tab. 5.5.: Sollstrecken und Höhendifferenzen der Kalibrierbasis Unna-Hemmerde.

Von 1 nach ...	Horizontalstrecke [m]	Höhe [m]	Raumstrecke [m]
... 3	141,2046	-0,4641	141,2054
... 4	317,7054	-1,1412	317,7074
... 5	529,4415	-1,8391	529,4447
... 6	776,4745	-2,7692	776,4794
... 8	1.200,0404	-1,9168	1.200,0419

Das Messprinzip des TLS und die angestrebte Systemüberprüfung weichen jedoch von diesem Grundgedanken ab, weshalb eine Adaption notwendig ist. Der Laserscanner lässt sich zum einen nur unzureichend horizontieren und es fehlt an einer Neigungskompensation, was den sachgemäßen Aufbau auf einem Messpfeiler selbst erschwert. Daher lassen sich auf dieser Grundlage keine Horizontalstrecken ableiten. Zum anderen werden Koordinaten im jeweiligen SOCS als primäres Ergebnis geliefert und nicht die originären Messwerte (Strecken und Winkel). Deshalb hat in Anlehnung an Staiger und Ettel (2003) die Genauigkeitsermittlung der Strecken- bzw. Längskomponente von einem weiteren Standpunkt aus zu erfolgen, der möglichst in einer Flucht mit den Messpfeilern liegt. Es sind zwei Standpunkte auszuwählen. Ein Standpunkt, der in Verlängerung der Referenzpunkte liegt, und ein weiterer, der zwischen den Referenzpunkten liegt. Nach DVW (2014) lässt sich mit dem zweiten Standpunkt eine Nullpunktkorrektion bestimmen, die nach Möser et al. (2012) für eine bestimmte Kombination eines Distanzmessers mit einem Reflektor gültig ist. Ergänzend dazu wird die Winkel- bzw. Querkomponente von einem weiteren Standpunkt aus erfasst, der in einem 90-Grad-Winkel außerhalb der Flucht liegt und einen Mindestabstand einhält, der der Basislänge entspricht.

Abbildung 5.8 zeigt die räumliche Situation vor Ort. Theoretische Vorgaben müssen sich an die tatsächlichen Verhältnisse vor Ort anpassen. Zur Bestimmung der Längskomponente wird ein Standpunkt (STP1) auf der Hälfte der Kalibrierbasis ausgewählt. Der Standpunkt wird ca. 2 m außerhalb der Flucht ausgewählt. Die Abweichung aus der Flucht hat keinen signifikanten Einfluss auf das zu erwartende Ergebnis. Zusätzlich wird die Wahl dahingehend getroffen, dass Prismen auf den Messpfeilern sich nicht

gegenseitig verdecken und die Vermessung aller Prismen in kurzen Zeitabständen erfolgen kann. Damit können externe Einflüsse, bspw. durch die Atmosphäre, minimiert werden, da in kurzen Zeiträumen von gleichen Bedingungen auszugehen ist. Messpfeiler 5 ist von «STP1» aufgrund der kurzen Distanz nicht messbar. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Strecken von den Messpfeilern 1 nach 6, 1 nach 8, 3 nach 6, 3 nach 8, 4 nach 6 und 4 nach 8 zu Bestimmung der Nullpunktkorrektion verwendet werden. Von «STP1» aus können die Strecken 1 nach 3, 1 nach 4 sowie 6 nach 8 für die Ermittlung der Längsabweichung genutzt werden, da sich eine vorhandene Nullpunktkorrektion durch Differenzbildung korrigieren lässt. «STP2» kann aufgrund der topographischen Gegebenheiten nur mit einem Abstand von etwa 400 m außerhalb zur Flucht der Kalibrierbasis bewerkstelligt werden. Von «STP2» aus sind alle Messpfeiler nutzbar. Zuletzt wird «STP3» in Verlängerung der Kalibrierbasis gewählt, um Streckendifferenzen frei von einer Nullpunktkorrektion zu bestimmen. «STP3» kann aufgrund der Örtlichkeit nur in direkter Nähe zu Messpfeiler 1 aufgebaut werden, sodass dieser Pfeiler von diesem Standpunkt aus nicht in die Auswertung mit einfließen kann. Somit reduziert sich die maximal Länge auf knapp über 1 km. Trotz dieser Limitierungen liefert dieses Testfeld eine sinnvolle Referenzgeometrie zur Systemprüfung eines Long Range Laserscanners. Analog zu den Ausführungen bei Staiger und Ettel (2003) wird der Soll-Ist-Vergleich überbestimmt durchgeführt, da fünf Teilstrecken zur Verfügung stehen.

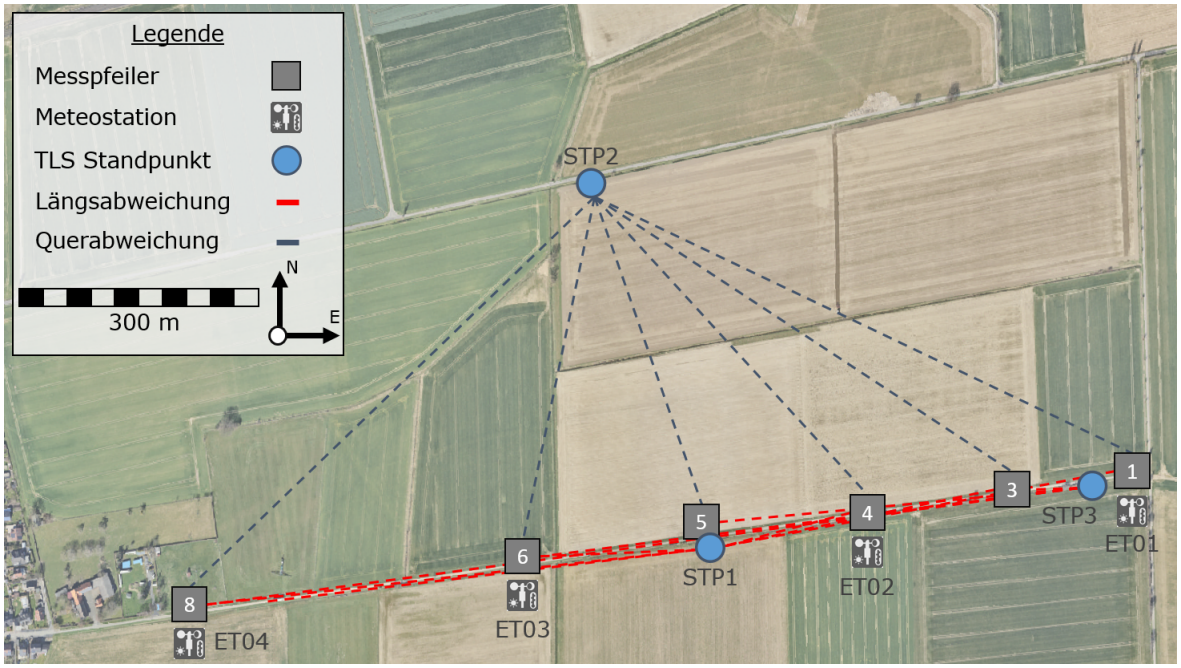


Abb. 5.8.: Räumliche Darstellung der Kalibrierbasis in Unna-Hemmerde. Es werden die Scannerstandpunkte (blaue Punkte) in Bezug zu den Messpfeilern (graue Vierecke) mit den entsprechenden Anzielungen (gestrichelt) visualisiert.

Durch die Differenzbildung von zwei Koordinatentripeln aus der Prismendetektion des TLS liegen jedoch Raumstrecken für den Vergleich vor. Die Sollstrecken wiederum existieren nur als Horizontalstrecken, sodass diese in Raumstrecken umzuwandeln sind. Mittels eines Feinnivellements werden hierfür die orthometrischen Höhenunterschiede zwischen den einzelnen Pfeilern mit Bezug auf die Pfeilerkopfplatte per Doppelnivellement bestimmt (Tab. 5.5). Die Genauigkeit der lokalen Höhen liegt nach der Ausglei-

chung unter 1 mm, was für diese Anwendung ausreicht. Im Gegensatz dazu bildet das SOCS eines jeden Standpunktes in Annäherung eine Tangentialebene an die Erdoberfläche. Da Raumstrecken und keine Höhenunterschiede relevant sind, ist eine Korrektur der Erdkrümmung vernachlässigbar. Die Korrektur lässt sich nach Möser et al. (2012) für eine Distanz von 1.200 m mit 0,113 m bestimmen. Eine Nichtberücksichtigung wirkt auf die Raumstrecke mit 5 Mikrometern und ist daher unerheblich. Damit Höhenunterschiede zwischen den Pfeilerkopfplatten auch im Niveau der Prismenzentren gültig sind, wird auf allen Pfeilern die gleiche Kombination an Prismen, Prismenhaltern und Dreifüßen verwendet. Diese Forderung sorgt dafür, dass auf nur sechs Pfeilern eine Installation erfolgt, da nicht mehr Equipment zur Verfügung steht. Es wird auf die Pfeiler 2 und 7 verzichtet.

Um systematische Einflüsse auf die Koordinatenbestimmung durch die Atmosphäre modellieren zu können, wird das Referenznetz mit meteorologischen Sensoren ausgestattet. An den Pfeilern 1, 4, 6 und 8 wird jeweils ein Sensor «ELITECH RC-51H» angebracht. Am Laserscanner selbst wird der interne meteorologische Sensor verwendet und ein weiterer externer Sensor vom Typ «W&T 57713». Das eingesetzte Equipment und die Sensorik sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tab. 5.6.: Zusammenfassung der Datenbasis und der zugehörigen Sensorik in Unna-Hemmerde.

Komponente	**Messdaten**	**Sensor**
Laserscanner	3D-Punktwolke der Prismen	RIEGL VZ-2000i
Prisma	-	LEICA GPR121
Prismenträger	-	LEICA GRT144
Dreifuß	-	GeoDesy 59-K370
Meteo-daten I	Temperatur Luftdruck Luftfeuchtigkeit	W&T #57713
Meteo-daten II	Temperatur Luftfeuchtigkeit	ELITECH #RC-51H

Die Messung startet auf STP1 (Abb. 5.8). Zunächst wird ein Scan der kompletten Szene durchgeführt und die fünf detektierten Prismen (1, 3, 4, 6 und 8) werden in der Software händisch ausgewählt. Es wird ein Messprogramm ausgeführt, in dem die ausgewählten Prismen im Abstand von zehn Minuten fünfmal nacheinander gescannt werden. Das Ergebnis sind 25 Koordinatentripel, aus denen sich zehn Vergleichsstrecken mit je fünf Messergebnissen ableiten lassen. Analog ist das Vorgehen auf «STP2» (Abb. 5.8). Hier werden 30 Koordinatentripel (Pfeiler 5 ist jetzt messbar) erhalten, aus denen sich 15 Vergleichsstrecken mit je fünf Messergebnissen ableiten lassen. Auf «STP3» werden 25 Koordinatentripel bestimmt, aus denen sich zehn Vergleichsstrecken ableiten lassen. Im nächsten Schritt werden die atmosphärischen Parameter angewendet und nach den Beschreibungen in Kapitel 2.5.2 an die Messergebnisse angebracht. Die Vergleichsstrecken werden mittels Formel 5.1 berechnet. Danach werden für die einzelnen Strecken (X_i) durch den Vergleich mit der bekannten Referenz (μ_X) zufäl-

lige Abweichungen (5.2) und in einem weiteren Schritt die Standardabweichung (σ_x) berechnet, wobei n in Gleichung 5.3 für die Anzahl der Streckenvergleiche steht.

$$\mathrm{S}_{i,j} = \sqrt{(\mathrm{X_j} - \mathrm{X_i})^2 + (\mathrm{Y_j} - \mathrm{Y_i})^2 + (\mathrm{Z_j} - \mathrm{Z_i})^2} \qquad (5.1)$$

$$\varepsilon_\mathrm{i} = \mathrm{x_i} - \mu_\mathrm{X} \qquad (5.2)$$

$$\sigma_\mathrm{x} = \sqrt{\frac{[\varepsilon_\mathrm{i}\varepsilon_\mathrm{i}]}{\mathrm{n}}} \qquad (5.3)$$

Das Ergebnis ist als Standardabweichung einer Raumstrecke zu interpretieren. Eine Raumstrecke ist aus jeweils zwei Prismendetektionen abgeleitet; in dieser Studie wird allerdings die Genauigkeit für eine einfache Prismendetektion in Längs- als auch Querrichtung angestrebt. Basierend auf Niemeier (2008) wird für diese Fallstudie angenommen, dass die einzelnen Detektionen gleichgenau und unkorreliert sind sowie unabhängig von der Streckenlänge. Mittels dieser Annahmen lässt sich mit Hilfe der Umkehrung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes für lineare Funktionen ein plausibles Maß herleiten. Die Unsicherheit einer einzelnen Prismendetektion berechnet sich entsprechend der Gleichung 5.4. Die Gleichungen 5.2 bis 5.3 werden jeweils für die Streckenvergleiche auf jedem Standpunkt (STP1 und STP2) angewendet und liefern somit die Genauigkeit in Längs- und Querrichtung.

$$\sigma_P = \frac{\sigma_\mathrm{x}}{\sqrt{2}} \qquad (5.4)$$

Nach DVW (2014) entspricht bei dieser Methodik die Abweichung aus einem Soll-Ist-Vergleich (x_i) der zweifachen Nullpunktkorrektion ($2k_i$). Da die Ermittlung überbestimmt erfolgt, werden die Werte zu einem arithmetischen Mittelwert $\bar{x}$ (Gl. 5.5) zusammengefasst. Ausgehend von Gleichung 5.5 werden die Verbesserungen v_i (Gl. 5.6) berechnet und, daraus ableitend, die empirische Standardabweichung s_x (Gl. 5.7) einer einzelnen Abweichung. Da der Mittelwert als zweifache Nullpunktkorrektur angesetzt wird, ist dessen empirische Standardabweichung $s_{\bar{x}}$ (Gl. 5.8) als Qualitätsmaß zu bestimmen. Der Mittelwert entspricht der zweifachen Nullpunktkorrektur, sodass dieser mit 2 zu dividieren, ist um die tatsächliche Additionskonstante zu erhalten (Gl. 5.9). Die Standardabweichung wird per Fehlerfortpflanzung bestimmt (Gl. 5.10). Final wird mittels Hypothesentest nach Benning (2011) überprüft, ob die Nullpunktkorrektur signifikant ist. Dazu werden die Nullhypothese $H_0 : k_0 = 0$ und die Alternativhypothese $H_1 : k_0 \neq 0$ überprüft. Die Standardabweichung wird empirisch ermittelt, sodass als Prüfverteilung die t-Verteilung angewendet wird. Es wird nach Gleichung 5.11 eine Prüfgröße ermittelt, die es in Wahrscheinlichkeitsgleichung 5.12 einzusetzen gilt. Ist die Gleichung wahr, wird die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α angenommen bzw. bei Unwahrheit abgelehnt und die Alternativhypothese ist gültig.

$$\bar{x} = \frac{[x_i]}{n} \qquad (5.5)$$

$$v_i = \bar{x} - x_i \qquad (5.6)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{[v_i v_i]}{n-1}} \qquad (5.7)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \qquad (5.8)$$

$$\bar{x} = 2k_0 = \frac{[2k_i]}{n} \qquad (5.9)$$

$$s_{k_0} = \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{2}} \qquad (5.10)$$

$$\hat{t} = \frac{k_0}{s_{k_0}} \qquad (5.11)$$

$$P\left\{|\hat{t}| \leq t_{f;1-\alpha/2}\right\} = 1 - \alpha \qquad (5.12)$$

5.2.2.2. Resultate

Die Resultate werden in zwei Teilen dargestellt. Zunächst werden die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse präsentiert, anschließend die Ergebnisse zur Bestimmung der Nullpunktkorrektion. Beiden Auswertungen liegt eine Berücksichtigung der tatsächlichen atmosphärischen Verhältnisse im Versuchsgebiet zugrunde. Die Scandaten selbst wurden bei der Messung vor Ort mittels der internen Sensorik am Laserscanner atmosphärisch korrigiert. Die meteorologischen Bedingungen werden in Abbildung 5.9 zusammengefasst. Oben links die Temperatur, oben rechts die relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck unten. Entsprechend der Tabelle 2.4 haben die gemessenen Parameter einen unterschiedlichen Einfluss auf die endgültigen Scandaten. Bei der Temperatur kommt es jeweils in den Zeiträumen der einzelnen Aufstellungen (STP1 bis STP3) teils zu erheblichen Schwankungen. Die Unterschiede des Luftdrucks sind lediglich auf «STP2» signifikant. Die relative Luftfeuchtigkeit hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse, wird dennoch bei den Messwerten korrigiert. Die Differenzen zwischen «W&T» und «RIEGL» werden damit erklärt, dass zum einen der interne Sensor («RIEGL») von der tatsächlichen Umgebung abgeschottet im Inneren der Hardware verbaut ist und zum anderen, dass vor Ort unterschiedliche atmosphärische Verhältnisse herrschen. STP1 und STP3 konnten aufgrund der vorliegenden Topographie im Schatten realisiert werden, wohingegen «STP2» frei unter der Sonne aufgebaut werden musste. Der signifikante Unterschied im Luftdruck deutet auf eine hohe thermische Variabilität am Standort «STP2». Nach Kapitel 2.5.2 wirkt dieser Umstand überwiegend auf die Vertikalkomponente einer Messung. Da diese hier nicht relevant ist, erfolgt über die atmosphärische Korrektur der Streckenmessung mittels Daten der externen Sensorik hinaus keine weitere Berücksichtigung.

Tab. 5.7.: Zusammenfassung der Ergebnisse von der Genauigkeitsanalyse in Unna-Hemmerde.

	σ_{x} [m]	σ_P [m]
Längskomponente	0,0018	0,0013
Querkomponente	0,0255	0,0180

Es folgen keine weiteren Korrekturen an den gescannten Daten. Nach Tabelle 5.7 wird für die Standardabweichung einer Raumstrecke in Längsrichtung ein Wert von 0,0018 m erreicht. Daraus ableitend lässt sich ein einzelnes Prisma mit einer Genauigkeit von 0,0013 m aus einem Scan extrahieren. Die Werte sind das Resultat einer iterativen Adaption der Auswertung. So sind beispielsweise aufgrund von Hindernissen in den einzelnen Scans nicht alle Daten für die Analyse nutzbar und werden daher nicht berücksichtigt. Zusätzlich wurde der Messpfeiler 3 im Zuge der Auswertung ausgeschlossen, da signifikant hohe einseitige Abweichungen (ca. 5 mm) ersichtlich waren, die auf eine Systematik hindeuteten. Da die Kalibrierbasis aktuell nicht mehr messtechnisch betreut wird, kann eine Deformation nicht ausgeschlossen werden. Bei der Betrachtung der detaillierten Ergebnisse in Tabelle A.1 sind keine groben Messfehler, Systematiken oder streckenabhängige Abweichungen in Form eines Maßstabs erkennbar. Analog zur Längsabweichung wird die Standardabweichung einer Raumstrecke in Querrichtung bestimmt. Es wird ein Wert von 0,0255 m erreicht. Die Querkomponente bei der Detektion eines einzelnen Prismas wird mit einer Genauigkeit von 0,0180 m ermittelt. Von «STP2» aus müssen keine Messungen wegen temporärer Sichthinder-

nisse von der Analyse ausgeschlossen werden. Zudem ist bei der Querkomponente die Systematik auf Messpfeiler 3 nicht ersichtlich. Das ist jedoch der niederen Genauigkeit gegenüber der Längskomponente geschuldet, sodass der Messpfeiler auch hier von der Auswertung ausgeschlossen wird. Die ausführlichen Ergebnisse in Tabelle A.3 und A.4 deuten ebenfalls nicht auf grobe Messfehler, Systematiken oder streckenabhängige Abweichungen hin.

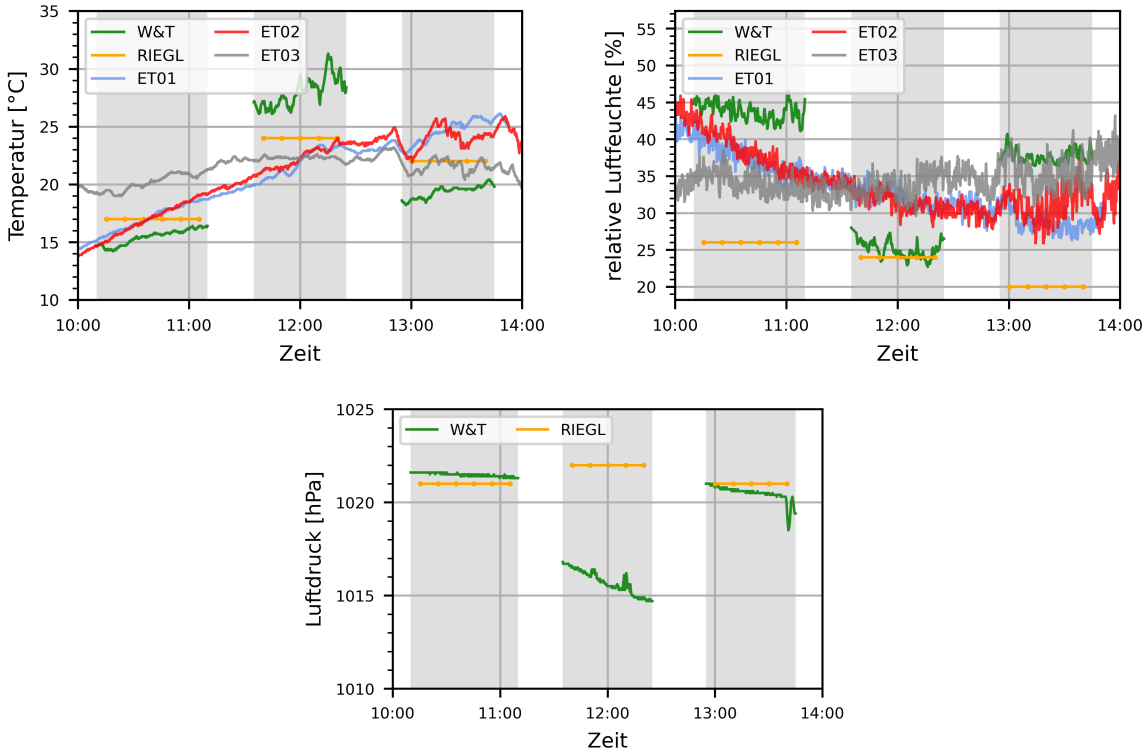


Abb. 5.9.: Meteorologische Messwerte am 21.03.2022 an der Kalibrierbasis in Unna-Hemmerde. Darstellung der internen Messwerte des Scanners und W&T #57713 während der Aufstellungen STP1, STP2 und STP3 (Graue Zeitfenster) sowie die kontinuierlichen Messreihen der Sensoren ELITECH #RC-51H (ET01 bis ET03) an den Messpfeilern entsprechend Abb. 5.8. Die Daten von «ET04» sind nicht verfügbar.

Schlussendlich wird die Nullpunktkorrektion für die Kombination - bestehend aus Laserscanner und Prisma - bestimmt. Es wird im Mittel eine Abweichung ($\bar{x}$) von -0,0040 m bestimmt. Durch die Division mit 2 wird die Nullpunktkorrektion (k_0) als Mittelwert von 28 Streckenvergleichen mit -0,0020 m erhalten. Über die Standardabweichung einer einzelnen Abweichung (s_x =0,0019 m) und der mittleren Abweichung ($s_{\bar{x}}$ =0,0004 m) wird eine Standardabweichung der Nullpunktkorrektion (s_{k_0}) von 0,0002 m erreicht. Die Nullpunktkorrektur wird mittels Hypothesentests (Kap. 5.2.2.1) auf Signifikanz geprüft. Nach Gleichung 5.11 wird die Prüfgröße $\hat{t}$ mit 10 bestimmt. Das Quantil der t-Verteilung entspricht $t_{27;1-0.001/2} = 3,690$. Da $\hat{t} > t_{27;1-0.001/2}$, wird die Nullhypothese aus Kap. 5.2.2.1 verworfen und die Nullpunktkorrektion wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 % nachgewiesen. Es sei nochmals erwähnt, dass diese Nullpunktkorrektion nur für die hier verwendete Kombination an Messsensorik gültig ist.

5.2.2.3. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Kapitel wird die Möglichkeit präsentiert, Corner Cube Prismen mittels TLS zu detektieren und für weitere Analysen zu verwenden. Die Detektion bietet den Vorteil, bspw. Tachymetrie mit TLS innerhalb eines Monitoringprojektes miteinander zu verknüpfen oder die identischen Punkte klassischerweise zur Registrierung/Georeferenzierung der einzelnen Scans zu nutzen. Außerdem können einzelne Prismen als Objektpunkte dienen und zusätzliche Informationen im Zuge einer flächenhaften Auswertung liefern. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird ein Konzept vorgestellt, das eine Systemüberprüfung, bestehend aus einem Laserscanner inkl. der Auswertealgorithmen (RIEGL VZ-2000i) und einem Prismentyp (LEICA GPR121), hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit in Längs- und Querrichtung ermöglicht. Zusätzlich kann eine Nullpunktkorrektur aus den Daten extrahiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzung von Prismen für tiefergehende Analysen im Long Range Bereich praktikabel ist und die Prismendetektion ein sinnvolles Feature für dieses Messsystem darstellt. Insbesondere die Genauigkeiten der Längsabweichung, die überwiegend durch die Streckenmessung beeinflusst werden, zeigen vergleichbare Werte zu einer tachymetrischen Streckenmessung. Die Querkomponente, die von der Richtungsmessung dominiert wird, ist in dieser Studie um einen Faktor von etwa 14 schlechter. Mehrere Punkte sind bei dieser Methode kritisch zu betrachten. Zum einen sind die erzielten Genauigkeitsmaße nur für Distanzen bis ca. 880 m (längs) und ca. 1.200 m (quer) gültig und Genauigkeiten der vertikalen Abweichung sind nicht ermittelbar. Zum anderen ist Vorsicht dahingehend geboten, dass durch die Systemprüfung Fehlereinflüsse einzelner Komponenten (bspw. Index- oder Achsabweichungen, Ausrichtung der Prismen zum Laserscanner) nicht ermittelt werden können und als Summe auf die Genauigkeitsangabe wirken. Aus diesem Grund lässt sich in dieser Fallstudie keine Aussage darüber tätigen, ob das Messsystem an sich, die Ausrichtung der Prismen zum Laserscanner oder die Auswertemethodik Ursache dafür sind, dass die Querkomponente gegenüber dem Streckenmessanteil von niederer Genauigkeit ist. Abschließend ist in Bezug zu dieser Studie erwähnenswert, dass die Kalibrierbasis nicht mehr gepflegt wird und die aktuelle Qualität der Referenzmaße unbekannt ist. Am Beispiel von Messpfeiler 3 muss bspw. von einer Deformation ausgegangen werden. Bei einer möglichen zukünftigen Entwicklung eines Prüfverfahrens von Long Range Laserscannern sind diese Punkte kritisch bei der Konzeptionierung zu berücksichtigen.

5.3. Fallstudie III: Valsertal (Tirol) / Österreich

Am 24.12.2017 hat sich im Valsertal / Tirol in Österreich (ca. 30 km südlich von Innsbruck) ein Felssturz ereignet. Nach Berger et al. (2021) lösten sich dabei etwa 117.000 m^3 Gesteinsvolumen mit einer maximalen Anbruchtiefe von 25 m und einer maximalen Anbruchhöhe von 150 m. Auf Basis zweier Laserscans, die 2008 und am 27.12.2017 direkt nach dem Ereignis stattgefunden haben, geben Anegg und Fritzmann (2019) die Kubatur der Ablagerung mit 130.000 m^3, die Ablagerungsfläche mit 50.000 m^2, eine Fallhöhe von 380 m und eine maximale Ablagerungshöhe von 9 m an. Durch das Ereignis wurde das Material aufgelockert, was einer Volumenzunahme von ca. 11,5 % entspricht (Hartl, 2019). Obwohl es weder menschliche Opfer noch nennenswerte Schäden an Gebäuden gab, wurde die unmittelbar unterhalb des Felssturzes gele-

gene Valser Landstraße mit 8 m Schutt und Geröll verschüttet (Hartl, 2019). Die Veränderung des Geländes machte eine Neubeurteilung der Lawinen- und Steinschlaggefahr erforderlich. Resultierend aus dieser Beurteilung wurden mehrere Barrieren und eine Querrinne als Schutz errichtet. Neben umfassenden dreidimensionalen Kartierungen der neuen Situation im Jahr 2018 wurde ein vermessungstechnisches Überwachungssystem für eine Langzeitbeobachtung durch die Geoinformation der Landesregierung Tirol installiert (Leitner, 2018). Das Überwachungssystem bestand aus einem Monitoring mittels Totalstation sowie Extensometern und Fissurometern (Anegg & Fritzmann, 2019). Ab 2020 hat die Landesregierung Tirol die Daten als auch die bestehende Infrastruktur des Überwachungssystems im Valsertal für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen und Implementierungen von PLS im alpinen Umfeld zur Verfügung gestellt. Das Kapitel wird in der Weise untergliedert, dass im folgenden Unterkapitel (Kap. 5.3.1) die zur Verfügung stehenden Messdaten präsentiert werden und darauf folgend Untersuchungen hinsichtlich atmosphärischer Einflüsse auf die Messergebnisse von PLS (Kap. 5.3.2) sowie Effekte unterschiedlicher Methoden zur Registrierung und Georeferenzierung multitemporaler Laserscandaten (Kap. 5.3.3) vorgestellt werden.

5.3.1. Beschreibung des Datensatzes

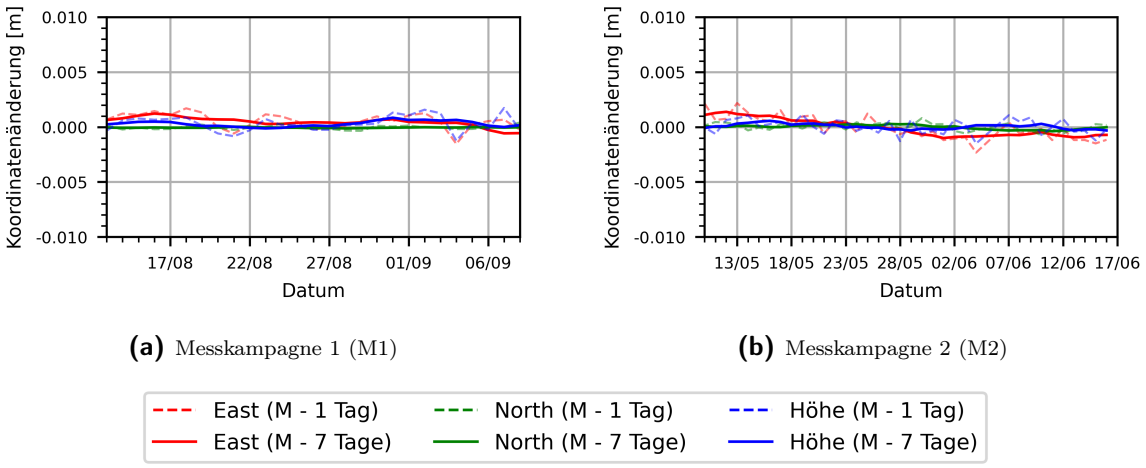
Ein geodätisches Monitoring, bestehend aus einer Totalstation (Modell: LEICA TM30) und 21 Prismen (Modell: LEICA GPR1), wurde am 28.01.2018 durch die Tiroler Landesregierung installiert. Die Totalstation wurde auf einem Messpfeiler in einer Schutzhütte etwa 800 m südlich am gegenüberliegenden Hang des Felssturzbereiches installiert und die Prismen oberhalb des Felssturzes in der Talsohle und in anderen Bereichen des Hangs verteilt (Abb. 5.11). Das Überwachungssystem wurde am 28.07.2018 um ein geotechnisches Monitoring, bestehend aus Extensometern und Fissurometern, erweitert, deren Daten in dieser Arbeit nicht verwendet werden. Im Juni 2021 wurden die Überwachungssysteme der Landesregierung Tirol abgebaut, da keine potentielle Gefahr mehr im überwachten Gebiet nachgewiesen werden konnte.

Da schon früher keine weiteren signifikanten Felsbewegungen in den Daten festgestellt worden waren, wurde die Infrastruktur des bestehenden Überwachungssystems 2020 für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Daher konnten in drei Messkampagnen permanente Installationen eines Laserscanners über einen Zeitraum von jeweils mehreren Wochen realisiert werden:

- Messkampagne 1 (M1): 13.08.2020 bis 08.09.2020.
- Messkampagne 2 (M2): 10.05.2021 bis 17.06.2021.
- Messkampagne 3 (M3): 28.07.2021 bis 17.12.2021.

Während der Kampagnen M1 und M2 standen die Daten der Totalstation ebenfalls zur Verfügung. Zur Überprüfung des Vorhandenseins einer stabilen Vergleichsgeometrie wurden die Daten aller Prismen auf die jeweils erste Messung einer Kampagne referenziert und, ausgehend davon, wurden die Koordinatenänderungen ermittelt. Aus den Änderungswerten aller Prismen wurde für die Abbildung 5.10 ein Tagesmittel (M - 1 Tag) berechnet und in einem weiteren Schritt ein Wochenmittel (M - 7 Tage). Bei der Betrachtung der Ergebnisse in den jeweiligen Zeiträumen wurde bestätigt, dass es zu

keiner signifikanten Bewegung an den Prismen kam (Abb. 5.10). Obwohl sich in Abbildung 5.10b bei «East» eine Systematik andeutet, kann im Sinne der hier vorgestellten Untersuchung die Aussage getätigt werden, dass keine Bewegungen detektiert sind, die die Messgenauigkeit der Prismendetektion mittels TLS (Kap. 5.2) überschreiten. Resultierend aus dieser Auswertung wird an dieser Stelle ein Open-Air-Labor vorgestellt. Auf Basis einer stabilen Vergleichsgeometrie in Form der Prismen und der simultanen Vermessung mittels Totalstation ist es möglich, verschiedene ingenieurgeodätische Fragestellungen unter realistischen Umweltbedingungen zu bearbeiten.



(a) Messkampagne 1 (M1) **(b)** Messkampagne 2 (M2)

Abb. 5.10.: Messergebnisse der Totalstation. Tages- und Wochenmittel der Koordinaten und zusätzliche Mittelbildung über alle Prismen in den Zeiträumen M1(links) und M2 (rechts). Gestrichelt = Tagesmittel; Durchgezogen = Wochenmittel.

Die Installationen des Laserscanners (RIEGL VZ-2000i) erfolgten auf einem zweiten Messpfeiler direkt neben der Totalstation in der Schutzhütte, sodass zum einen eine ständige Stromversorgung gewährleistet war und zum anderen das Messsystem zusätzlich von Wettereinflüssen geschützt wurde. Die Datenerfassung wurde für die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Hinblick auf den Einsatz von PLS mit großen Messreichweiten innerhalb eines ferngesteuerten, webbasierten Monitoringsystem aus ingenieurgeodätischer Sicht konzipiert. Während der Messkampagnen M2 und M3 wurde - im Gegensatz zur Kampagne M1 - ein anderer Laserscanner eingesetzt, welcher allerdings vom gleichen Hersteller, Typ und Modell war. Auf mögliche Differenzen in den Messdaten, die aus dem Einsatz unterschiedlicher Laserscanner zustande kommen könnten, wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Neben dem Laserscanner und der Totalstation, wurden zwei Neigungssensoren am Vermessungspfeiler (PC-IN1-1°), an dem der Laserscanner befestigt war, installiert. Dadurch können Fragestellungen hinsichtlich der Stabilität der Installation an sich beantwortet werden. Zusätzlich wurden sieben meteorologische Sensoren an der Schutzhütte selbst und im Überwachungsgebiet eingerichtet. Aus der Notwendigkeit einer ständigen Stromversorgung wurden die präziseren meteorologischen Sensoren von W&T nur an der Schutzhütte, in der Talsohle und im unteren Bereich des Felssturzgebietes installiert. Die Temperaturlogger von ELITECH, die keine zusätzliche Stromversorgung benötigen, wurden oberhalb des Felssturzareals befestigt. Die ergänzenden Messdaten können dazu verwendet werden, diurnale und saisonale systematische Effekte auf die Messwerte des Laserscanners zu verifizieren. Während in Kampagne M1 zusätzlich externe meteorologische Mess-

werte von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) genutzt wurden, kam in der Kampagne M2 und M3 eine weitere Wetterstation (LAMBRECHT U[SONIC]WS7) an der Schutzhütte zum Einsatz. Des Weiteren unterstützen die im stabilen Fels installierten Prismen verschiedene methodische Ansätze zur Verifizierung solcher Effekte, da neben der Totalstation der Laserscanner in der Lage ist, diese zu detektieren (Kap. 5.2.1). Die räumliche Lage der Sensorik zueinander wird in Abbildung 5.11 zusammengefasst.

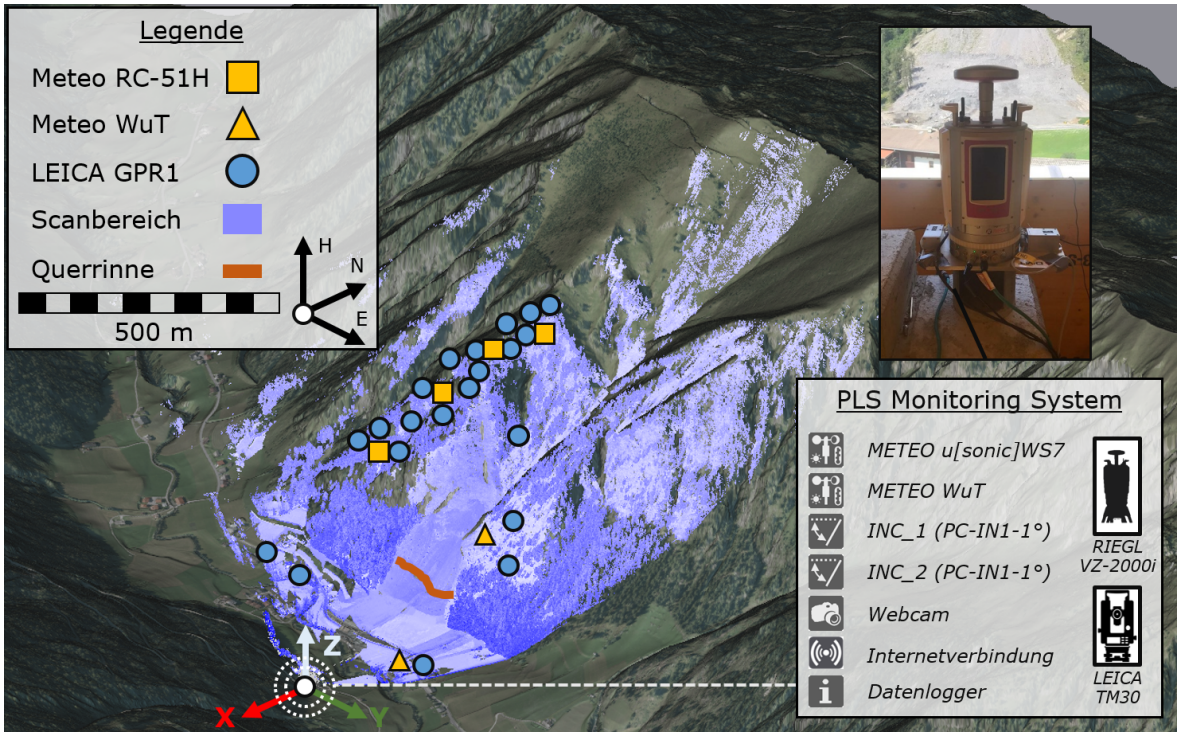


Abb. 5.11.: Dreidimensionale Darstellung des Testgebietes am Felssturz im Valsertal mit integrierter Sensortechnik, deren räumliche Lage zueinander sowie Darstellung der hergestellten Querrinne. DGM und Orthofotos: *Land Tirol - «data.tirol.gv.at»*.

Im Rahmen der Datenerfassung mittels PLS wurden alle zwei (M1) und alle drei Stunden (M2 und M3) Scans des Überwachungsgebiets mit einer Auflösung von 15 mdeg und einer Aufnahmefrequenz von 50 kHz durchgeführt. Wie aus Tabelle 5.8 hervorgeht, wurden zwischen den regulären Intervallen Scans von den Prismen aufgenommen. Während der ersten beiden Messkampagnen wurden die Prismen zusätzlich stündlich von der Totalstation messtechnisch erfasst, sodass diese Daten für vergleichende Analysen zur Verfügung stehen. In Kampagne M3 standen die Monitoringsysteme der Landesregierung für die Verifizierung der Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung. Während der drei Messkampagnen wurden die meteorologischen Parameter in einem Intervall von 15 Sekunden (W&T #57713), 15 Minuten (ELITECH #RC-51H) bzw. 10 Minuten (ZAMG) aufgezeichnet. Die Neigungssensoren am Messpfeiler zeichneten Daten alle 15 Sekunden auf. Tabelle 5.8 fasst die eingesetzte Sensorik inklusive der Messintervalle und ihres Einsatzes in den jeweiligen Messkampagnen zusammen. Aus den drei Messkampagnen entsteht eine umfassende Datengrundlage zur Untersuchung des Einsatzes terrestrischer Laserscanner im alpinen Umfeld. In dieser Arbeit werden zwei Untersuchungsschwerpunkte in den folgenden Kapiteln aufgezeigt.

Tab. 5.8.: Zusammenfassung der Datenbasis und der zugehörigen Sensorik im Valsertal.

Messdaten	**Sensor**	**Messfrequenz**	**Kampagne**
3D-Punktwolke des Fels	RIEGL VZ-2000i Gerät A	120 Minuten • 1 3D-Scan (15 Min.) • 5 Prismenscans (21 Min.)	M1
3D-Punktwolke der Prismen			
3D-Punktwolke des Fels	RIEGL VZ-2000i Gerät B	180 Minuten • 1 3D-Scan (15 Min.) • 2 Prismenscans (60 Min.)	M2, M3
3D-Punktwolke der Prismen			
3D-Messung zu den Prismen	LEICA TM30	60 Minuten	M1, M2
Neigung Messpfeiler	PC-IN1-1°	15 Sekunden	M1, M2, M3
Temperatur Luftdruck Luftfeuchtigkeit	W&T #57713	15 Sekunden	M1, M2, M3
Temperatur Luftfeuchtigkeit	ELITECH #RC-51H	15 Minuten	M1, M2
Globalstrahlung	ZAMG.AC.AT Meteostation: Schmirn, Brenner, Steinach	10 Minuten	M1
Temperatur Luftdruck Luftfeuchtigkeit Wind-geschwindigkeit Windrichtung Globalstrahlung Taupunkt	LAMBRECHT U[SONIC]WS7	15 Sekunden	M2, M3

5.3.2. Geodätische Refraktion als Einfluss auf die Messergebnisse eines PLS

Friedli et al. (2019) zeigen in ihrem Paper, dass die atmosphärische Refraktion einen signifikanten Einfluss auf Messungen eines TLS im Long Range Bereich hat. Dabei ist die Vertikalrefraktion dominierend und es werden in einem Versuchsfeld am Aletschgletscher (Kanton Wallis / Schweiz) Höhendifferenzen von bis zu mehreren Dezimetern bei Messungen über Entfernungen von 1 bis 2 km erreicht. Die Autoren beschreiben, dass eine Korrektur dieser Einflüsse nicht möglich ist (bspw. mit Hilfe meteorologischer Messungen) und bis jetzt auch kein geeignetes datenbasiertes Korrekturmodell existiert. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass Laserscans über große Entfernungen vorzugsweise abends in den Stunden nach dem Sonnenuntergang durchzuführen sind. Dieser Zeitpunkt ist an diesem speziellen Standort sowie zur Jahreszeit während des Messexperiments als atmosphärisch stabil identifiziert.

Die Erkenntnisse von Friedli et al. (2019) motivieren im Zuge dieser Arbeit eine Methode vorzustellen, die es ermöglicht, atmosphärische Einflüsse im Versuchsfeld im Valsertal zu beobachten. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in der Schweiz handelt es sich beim Versuchsaufbau im Valsertal um eine permanente Installation. Refraktive Einflüsse auf die nahezu kontinuierlichen Zeitreihen führen zu Scheindeformationen, die wiederum zu fehlerhaften Alarmierungen führen können. Die Auswahl von Zeitpunkten mit stabiler Atmosphäre sind bei permanenten Installationen nicht praktikabel. Aus diesem Grund soll mittels der hier vorgestellten Methode eine Analyse der Messdaten in Verbindung mit meteorologischen Daten und der vorliegenden Topographie durchgeführt werden. Ziel ist es, daraus ableitend Empfehlungen zum Aufbau von PLS auszusprechen, mit denen eine Minimierung geodätischer Refraktion möglich ist.

5.3.2.1. Datenbeschreibung und Methodik

Für die Untersuchung der atmosphärischen Einflüsse im Valsertal wird nur ein Teil der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Daten genutzt. Es wird ein Zeitraum vom 20.08.2020 bis einschließlich 25.08.2020 ausgewählt. Dieser Zeitraum ist meteorologisch durch zwei Tage mit extremer Wärme (20. und 21.08.2020) gekennzeichnet sowie an den restlichen vier Tagen von wechselnden Bedingungen (Sonne, Schauer, Gewitter und länger anhaltendem Regen). Um die tatsächlich im Messgebiet vorliegenden meteorologischen Parameter während des Versuchsaufbaus zu dokumentieren, werden Daten von sieben räumlich verteilten Sensoren verwendet (Kap. 5.3.1). Vier Sensoren (ET01 bis ET04) vom Typ ELITECH RC-51H und drei Sensoren (METEO04 bis METEO06) vom Typ W&T 57713 werden eingesetzt. Ein Sensor (METEO06) ist an der Schutzhütte angebracht und soll Messwerte im Umfeld des Laserscanners erfassen. Ein weiterer Sensor in der Talsohle (METEO05) und am gegenüberliegenden Hang (METEO04) komplettieren das Querprofil. Vier weitere Sensoren (ET01 bis ET04) sind in gleichen vertikalen Abständen oberhalb des Felssturzbereiches installiert. «METEO04» bis «METEO06» zeichnen Daten in einem Messintervall von 15 Sekunden und «ET01» bis «ET04» in einem Messintervall von 15 Minuten auf.

Die Untersuchungen basieren auf der Möglichkeit, Prismen als eindeutige Punkte im Messgebiet zu detektieren (Kap. 5.2). Mittels dieser Funktion werden während des ausgewählten Zeitraums 21 Prismen in einem zeitlichen Abstand von 21 Minuten wiederkehrend gemessen. Für die hier gezeigte Untersuchung werden fünf Prismen (F1,

F2, 1B, 6B und 12B) in verschiedenen Höhenlagen ausgewählt. Abbildung 5.12 zeigt die vertikale Position der Prismen sowie die der meteorologischen Sensoren zueinander. Die Auswahl der Prismen betrifft zudem nur einen Quadranten, da dadurch erwartet wird, dass die Messungen untereinander in Abhängigkeit von der Topographie in Relation gesetzt werden können und sich somit Rückschlüsse auf die Einflussfaktoren ziehen lassen (Abb. 5.13).

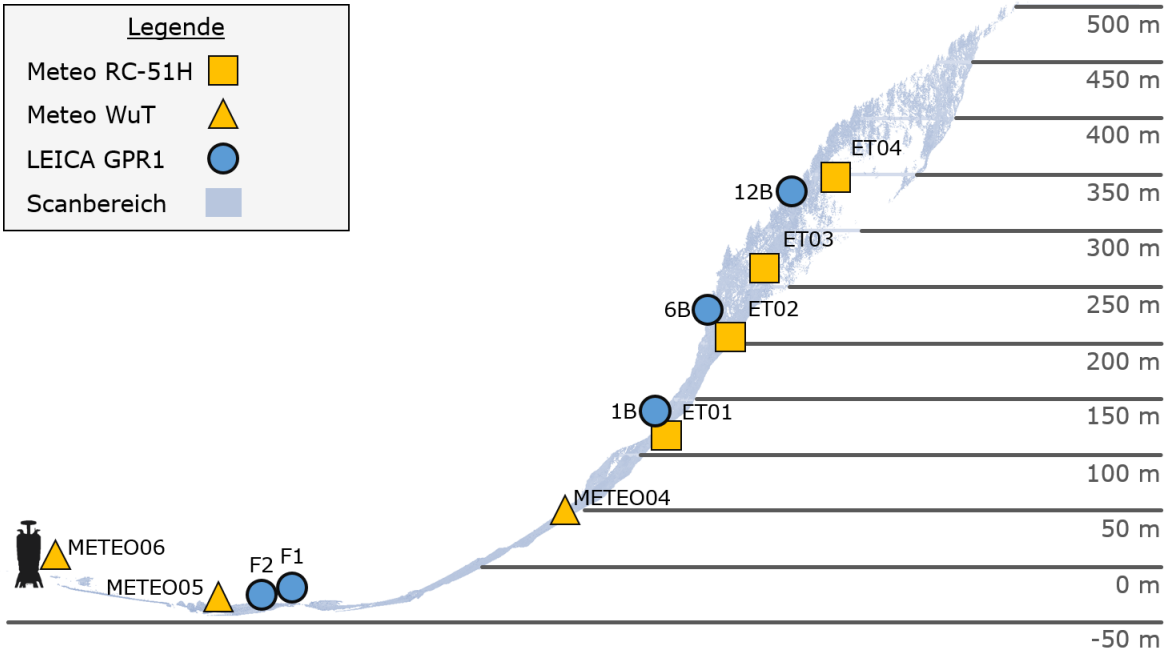


Abb. 5.12.: Skizzierung eines Vertikalschnitts entlang des Querprofils «Meteosensorik» (Abb. 5.13) mit Darstellung des Laserscanners, der ausgewählten Prismen und der verteilten meteorologischen Sensoren im Messgebiet.

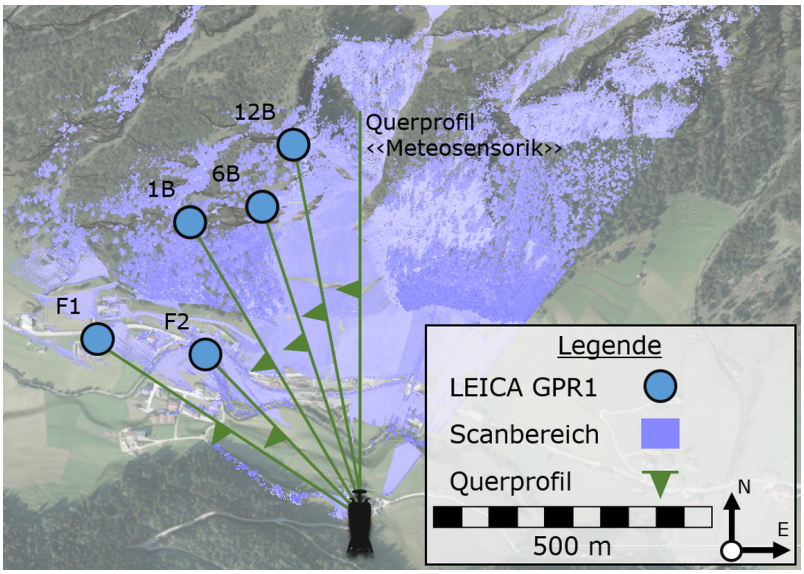


Abb. 5.13.: Draufsicht auf das Messgebiet mit Darstellung des Laserscanners, der ausgewählten Prismen und der zugehörigen Querprofile einschließlich der jeweiligen Blickrichtung auf die Profilzeichnungen (Abb. 5.23 und 5.24). Orthofoto: *Land Tirol - «data.tirol.gv.at»*.

Nach Hennes (2002) hat die Refraktion in der freien Umwelt (keine Gebäude oder Tunnelbauten nahe des Messstrahls) einen dominanten Einfluss auf die Messwerte in der Vertikalen. Um vergleichende Untersuchungen anstellen zu können, wird daher von jedem Prisma der Zenitwinkel einer jeden Messung in Bezug zum SOCS extrahiert. Aus den absoluten Winkelmaßen werden in einem weiteren Schritt relative Winkeländerungen mit Bezug zum 20.08.2020 um 6:00 Uhr berechnet. Da nicht bekannt ist, wann zu dieser Jahreszeit in dieser Messumgebung stabile atmosphärische Bedingungen vorherrschen, wird dieser Zeitpunkt kurz vor Sonnenaufgang ausgewählt. Die Zeitreihen der Prismen in Abbildung 5.14 zeigen einen gleichartigen systematischen Verlauf, der sich in Abhängigkeit der Tageszeit ändert. Der maximale Ausschlag in der Grafik beträgt etwa -6 mgon, was sich in einer vertikalen Abweichung von ca. 1 dm in einer Messdistanz von 1 km auswirkt.

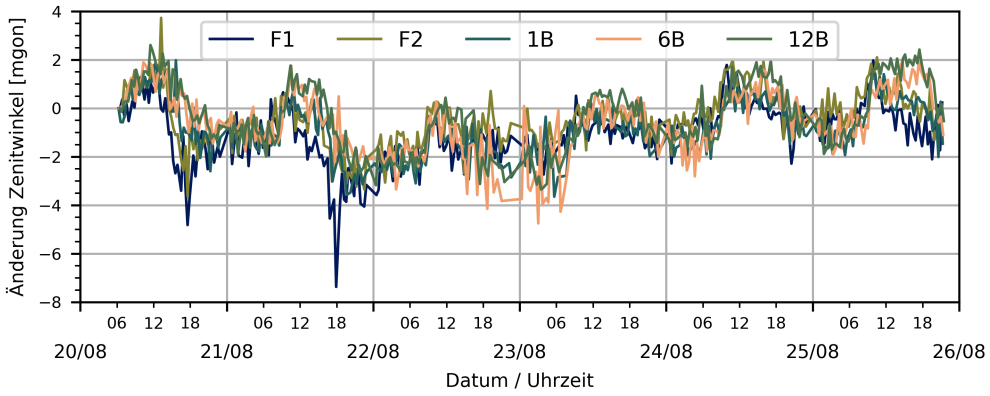


Abb. 5.14.: Zeitreihen der Zenitwinkel (ϑ) der ausgewählten Prismen im unkorrigierten SOCS.

An dieser Stelle ist jedoch zu hinterfragen, ob die systematischen Änderungen der Messwerte ihren Ursprung alleine in einer refraktionsbedingten Winkeländerung haben. Frukacz et al. (2017) zeigen für die Monitoringanwendung einer Totalstation, dass Messpfeiler, auf denen die Instrumente üblicherweise installiert sind, nicht zu vernachlässigende Bewegungen im Tagesgang aufweisen. Diese Beobachtung machen auch Voordendag et al. (2022) bei der Anwendung eines permanent installierten Laserscanners. Damit wird die Annahme widerlegt, dass bei permanenten Installationen ein TLS über die gesamte Zeit an einer festen Position bleibt (Voordendag et al., 2022). Während die interne Neigungssensorik einer Totalstation diese Bewegungen berücksichtigen kann (Frukacz et al., 2017), führen Voordendag et al. (2022) aus, dass bei Messungen mittels TLS bereits kleine Veränderungen in der Position und Lage große Auswirkungen auf die Beobachtungen in großen Distanzen haben. Üblicherweise ist eine automatische Neigungskompensation bei gängigen TLS nicht verfügbar.

Um die möglichen Einflüsse auf die in Abbildung 5.14 dargestellten Ergebnisse eruieren zu können, wurde folgender Messaufbau gewählt: Der Laserscanner RIEGL VZ-2000i, der bei diesem Test zum Einsatz kam, hat keine internen Neigungssensoren, die mit entsprechender Genauigkeit Pfeilerbewegungen messen können. Der Laserscanner wurde daher um eine Inklinometerplatte erweitert, die an der Unterseite direkt mit dem Scanner verbunden wurde (Abb. 5.11). Auf der Platte selbst wurden zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Neigungssensoren vom Typ PC-IN1-1° (Genauigkeit: 0,0175 mm/m) angebracht, die wiederum parallel zur X- bzw. Y-Achse des SOCS

ausgerichtet waren. Die Vorrichtung wurde auf Basis technischer Zeichnungen des Herstellers realisiert. Neben der Neigungssensorik war auf einem zweiten Messpfeiler eine Totalstation installiert, deren Daten ebenfalls zur Verifizierung der Messergebnisse herangezogen werden können. Der technische Aufbau ist in der Abbildung 5.15 skizziert.

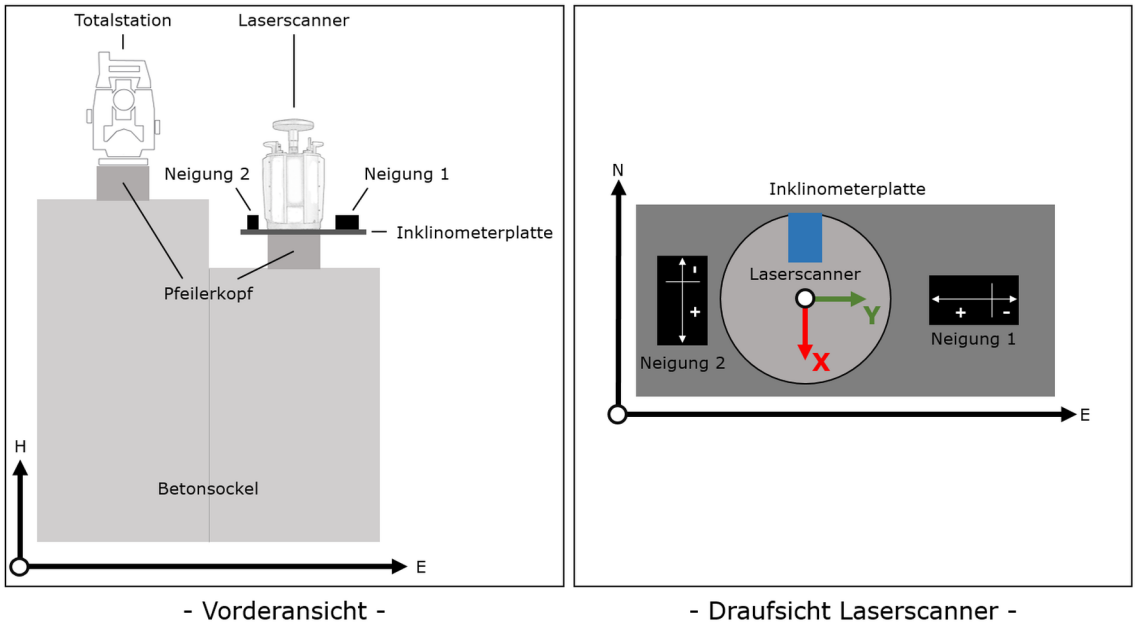


Abb. 5.15.: Skizzierung des technischen Aufbaus der Messeinrichtungen in der Schutzhütte im Valsertal. Links ist die Vorderansicht der Systemkonfiguration bestehend aus Laserscanner, Totalstation und Neigungssensorik zu sehen. Rechts die Draufsicht auf den Laserscanner mit der Anordnung der Neigungssensoren.

Die Daten wurden mit unterschiedlichen Messintervallen erfasst. Die Totalstation lieferte zu jedem Prisma einen Messwert pro Stunde. Da es sich um eine bestehende Installation handelte, war keine Einflussnahme auf das Messintervall möglich. Die Neigungssensorik auf der Inklinometerplatte misst in einem Intervall von 15 Sekunden. Der Laserscanner selbst führte ein Messprogramm aus, dass sich alle zwei Stunden wiederholte. Zunächst wurde ein Scan des Felssturzareals durchgeführt, der etwa 13 Minuten dauerte (diese Daten sind für dieses Kapitel nicht relevant). Anschließend wurden nacheinander die 21 Prismen gescannt, wobei jeder Prismenscan zu einer vollen Minute startete. Die Prismenscans wurden 5-mal wiederholt. Nach 118 Minuten war der Zyklus durchlaufen und begann zur vollen Stunde erneut, sodass der Prozess pro Tag 12-mal wiederholt werden konnte.

Zunächst werden die Messdaten der Inklinometer visualisiert und hinsichtlich möglicher Pfeilerbewegungen untersucht. Im nächsten Schritt werden die Daten der Prismenscans und der Inklinometer synchronisiert. Wobei in diesem Prozessschritt der zeitlich nächstgelegene Inklinometermesswert dem Prismenwert zugeordnet wird und keine Filterung der Inklinometerdaten stattfindet. Mit Hilfe der Gleichung 5.13 werden die Neigungsdaten genutzt, um die Daten des Laserscanners ($\mathbf{X}_{\mathrm{SOCS}}$) anzupassen. Mit der vorliegenden technischen Konfiguration lassen sich jedoch nur die Rotationen um die X- und Y-Achse korrigieren. Aus diesem Grund und zusätzlich, dass nur kleine Drehwinkel (ε) erwartet werden, vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\mathbf{X}_{\mathrm{INCL}} = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_3 & -\varepsilon_2 \\ -\varepsilon_3 & 1 & \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 & -\varepsilon_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{X}_{\mathrm{SOCS}} \tag{5.13}$$

Die Zeitreihen der korrigierten Scandaten ($\mathbf{X}_{\mathrm{INCL}}$) werden erneut visualisiert. Visuell als auch datenbasiert werden die Daten in Beziehung zu den meteorologischen Parametern gesetzt und es wird versucht, die Ursache möglicher Abweichungen zu benennen. Parallel dazu werden die Rohdaten der Totalstation für die Verifizierung der Laserscandaten aufbereitet. Bei der Totalstation wird davon ausgegangen, dass die internen Neigungskompensatoren eine etwaige Pfeilerbewegung berücksichtigen und die Daten nicht negativ beeinflusst werden. Analog zum Laserscanner werden die Veränderungen des Vertikalwinkels mit Bezug zum 20.08.2020 um 06:00 Uhr als Verifizierung der TLS-Daten verwendet.

5.3.2.2. Resultate

Zunächst werden die Daten der beiden Neigungssensoren betrachtet (Abb. 5.16). In Rot wird «Neigung 1» und in Blau «Neigung 2» dargestellt. Zusätzlich wird in Schwarz die Temperatur des Datenloggers der Neigungssensoren und in Grau die Temperatur von «METEO06» dargestellt. Beide Neigungssensoren zeigen ein periodisches Muster, das visuell eine Abhängigkeit von der Tageszeit aufweist. Die Magnituden der Neigungswerte sind auf einem ähnlichen Niveau wie die Änderungen der Zenitwinkel bei den Prismenmessungen in Abbildung 5.14. Die maximalen Ausschläge von «Neigung 1», der parallel zur Y-Achse des SOCS misst und somit rechtwinklig zur vorherrschenden Messrichtung installiert ist, sind um einen Faktor 2 bis 3 höher als bei «Neigung 2». Aufgrund dieser Datenbasis kann eine Bewegung des Messpfeilers nicht mehr ausgeschlossen werden.

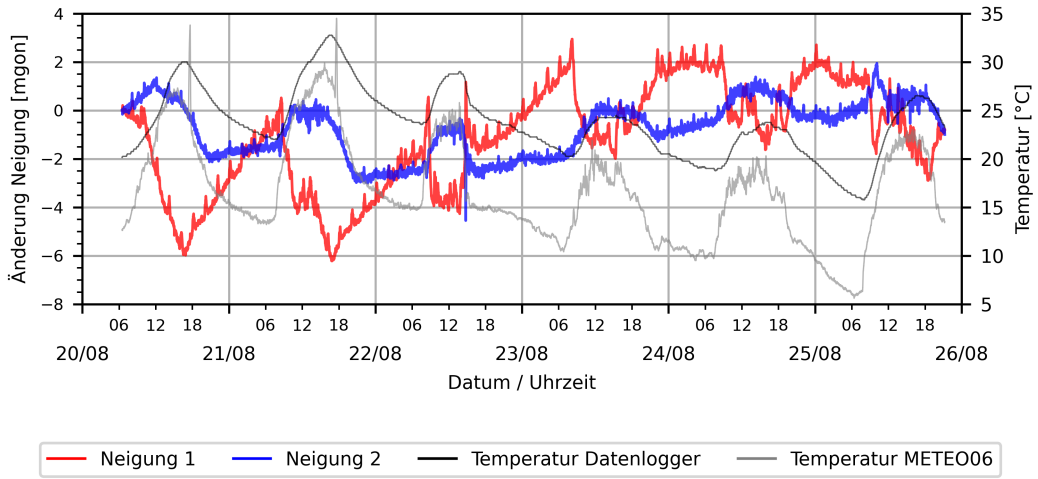


Abb. 5.16.: Messwerte der Neigungssensorik an der Inklinometerplatte am Laserscanner in vergleichender Darstellung mit der Temperatur des Datenloggers und an «METEO06».

Im nächsten Schritt werden die Daten der Prismenscans (Abb. 5.14) und die der Neigungssensoren (Abb. 5.16) visuell verglichen und auf Korrelation geprüft. Die Änderungswerte von «Neigung 2» sind bei einem visuellen Vergleich in Abbildung 5.17 nahezu identisch, was auch ein Korrelationskoeffizient von $r = 0{,}75$, als Mittelwert

aller Koeffizienten der fünf Zeitreihen der Prismen, bestätigt. Die Zeitreihen der Prismen «F1» und «F2» folgen am 20.08. und 21.08.2020 nicht gänzlich dem Verlauf der Neigungsdaten, was auf eine weitere Ursache gegenüber der Pfeilerbewegung deutet. Die Neigungswerte von «Neigung 1» sind in den Scandaten visuell als auch anhand der Korrelationskoeffizienten nicht zu identifizieren. Das Ergebnis zeigt bisher, dass eine Pfeilerbewegung um die Y-Achse vorliegt, die die systematischen Änderungen in den unkorrigierten Zeitreihen der Prismenscans (Abb. 5.14) erklärt. An dieser Stelle sind keine Rückschlüsse auf eine atmosphärische Refraktion möglich.

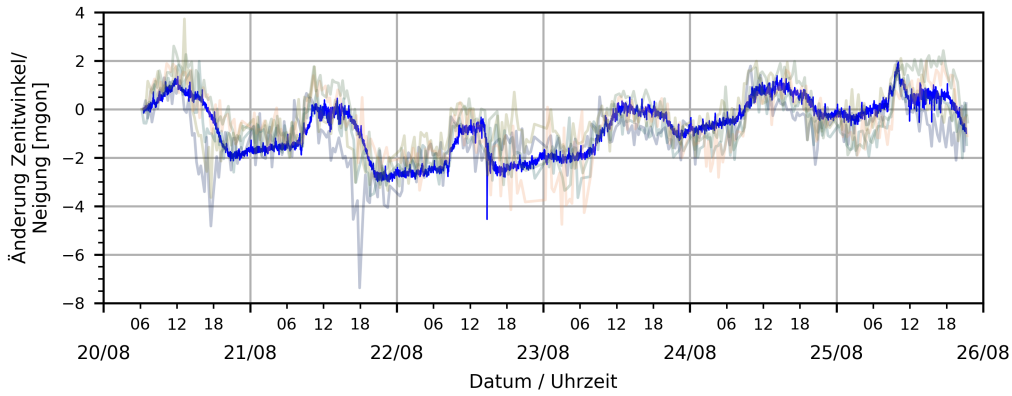


Abb. 5.17.: Vergleich der Zenitwinkeländerung an den Prismen gegenüber den Neigungsänderungen an «Neigung 2» (blau).

Die detektierten Neigungsänderungen, die mittels «Neigung 1» gemessen wurden, haben keine Auswirkung auf die Bewegung des Scanners und in den Messdaten der Zenitwinkel sind die Signale nicht wiederzufinden. Zum einen, da die Neigung rechtwinklig zur Hauptmessrichtung wirkt und damit nicht direkt in die Messergebnisse einfließt, und zum anderen, da ein Mangel in der Messkonfiguration vermutet wird. Die jeweiligen Daten der Neigungssensoren werden mit den Temperaturdaten des Datenloggers der Neigungssensoren und denen von «METEO06» verglichen. Aus dem Vergleich werden Korrelationskoeffizienten berechnet. Ein Korrelationskoeffizient von r = -0,89 (Neigung und Temperatur des Datenloggers) bzw. r = -0,81 (Neigung und METEO06) zeigt, dass die Änderung von «Neigung 1» einen hohen linearen Zusammenhang gegenüber der Änderung der Temperatur aufweist. Demgegenüber zeigt der Korrelationskoeffizient bei der Gegenüberstellung von «Neigung 2» und der Temperatur nur einen schwachen Zusammenhang von r = 0,15 bzw. r = 0,21. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass sich dieser Umstand mittels der spezifischen Wärmekapazität erklären lässt. Die spezifische Wärmekapazität besagt, dass man verschiedenen Stoffen gleicher Masse unterschiedliche Wärme zuführen muss, um deren Temperatur um den gleichen Betrag zu erhöhen (Dobrinski et al., 2010). Der Wert liegt für Beton, aus dem der Messpfeiler hergestellt ist, fast doppelt so hoch wie für Edelstahl, aus dem die Inklinometerplatte gefertigt ist (Kuchling, 2022). Es wird also weniger Energie benötigt, um den Edelstahl auf Temperatur reagieren zu lassen, was bei Erwärmung wiederum zu einer Ausdehnung des Materials führt. Abbildung 5.11 und 5.15 zeigen, dass die Platte nicht symmetrisch unter dem Scanner angebracht ist und in Richtung von «Neigung 1» mehr Material aufweist, das sich ausdehnen kann. Es wird angenommen, dass die vorliegenden Messwerte von «Neigung 1» die Reaktion der Inklinometerplatte auf den Temperatureinfluss zeigt und nicht die Bewegung des Scanners

bzw. des Messpfeilers. Im Zuge dieser Fallstudie werden die Werte von «Neigung 1» von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Infolgedessen werden die Messdaten aus Abbildung 5.14 mittels Gleichung 5.13 korrigiert. Wie beschrieben, werden nur die Daten von «Neigung 2» als Korrektur angesetzt. Es entsteht Abbildung 5.18. Die Messdaten des Laserscanners werden zusätzlich mit Hilfe eines gleitenden Mittelwerts über zwei Stunden (Dauer eines Zyklus des Messprogramms am Laserscanner) gefiltert dargestellt. Das periodische Muster aus Abbildung 5.14 ist nicht mehr zu sehen und die Korrektur mittels der Neigungsdaten sorgt für Messwerte, die im Mittel um Null schwanken. Bei der Betrachtung der einzelnen Zeitreihen ist zu sehen, dass es insbesondere am 20. und 21.08.2020 temporär zu erheblichen Abweichungen von bis zu -4 mgon kommt. Es fällt auf, dass hiervon speziell die in der Talsohle liegenden Punkte «F1» und «F2» betroffen sind. Punkt «F1» zeigt ein ähnliches Verhalten am 22., 24. und 25.08.2020, allerdings in abgeschwächter Form. Bei der Betrachtung der ersten beiden Tage in Abbildung 5.18 ist zudem zu sehen, dass die Magnitude der Abweichungen zunimmt, je tiefergelegen ein Prisma ist.

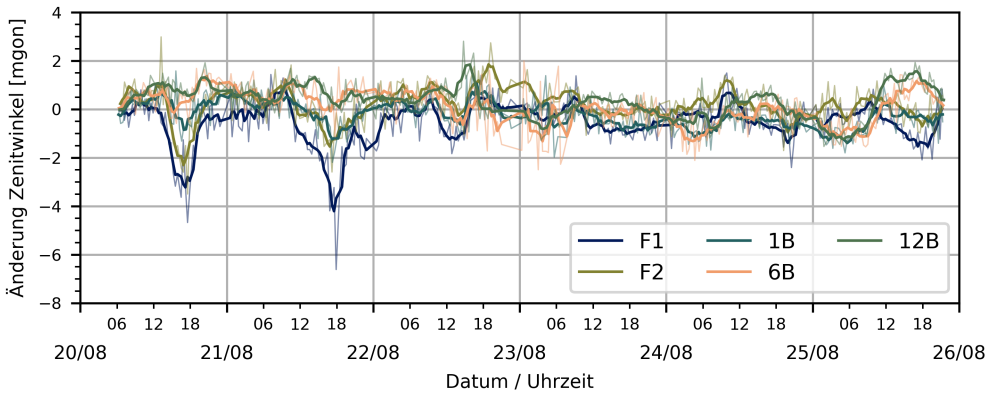


Abb. 5.18.: Zeitreihen der korrigierten Zenitwinkeländerungen - erfasst mittels Laserscanner.

Zur Verifizierung der Ergebnisse wird eine Grafik mit den Daten der Totalstation erzeugt (Abb. 5.19). Die Messungen der Totalstation werden nur einmal pro Stunde ausgeführt. Um eine Vergleichbarkeit zu den Messungen mit dem Laserscanner einfacher zu gestalten, wird ebenfalls ein gleitender Mittelwert über zwei Stunden berechnet und dargestellt. Beim Vergleich der Abbildungen 5.18 und 5.19 ist ein gleichartiges Verhalten der Zeitreihen zu sehen. Insbesondere die Veränderungen der Messdaten am 20. und 21.08.2020 zeigen eine hohe Ähnlichkeit, auch bei den Maximalwerten. Die Abweichungen an Punkt «F1» können am 22. und 24.08.2020 durch die Totalstation nicht bestätigt werden. Am 25.08.2020 sind in den Messdaten der Totalstation jedoch ebenfalls ähnliche relative Veränderungen im Zenitwinkel nachgewiesen. Mittels der Neigungskorrektur und der anschließenden Ergebnisverifizierung mittels der Totalstation lässt sich die Aussage treffen, dass die Abweichungen in Abbildung 5.14 ihren Ursprung in einer Bewegung des Laserscanners bzw. des Messpfeilers haben. Nach der Neigungskorrektur sind die Zeitreihen beider Messsysteme ähnlich und die übriggebliebenen Abweichungen zeigen ebenfalls ein übereinstimmendes Verhalten.

Es wird vermutet, dass die noch vorhandenen Abweichungen durch refraktive Einflüsse zustande kommen. In Kapitel 2.5.2 wird dargestellt, dass das Verständnis der Mikrometeorologie einen essentiellen Beitrag zur Interpretation atmosphärischer Re-

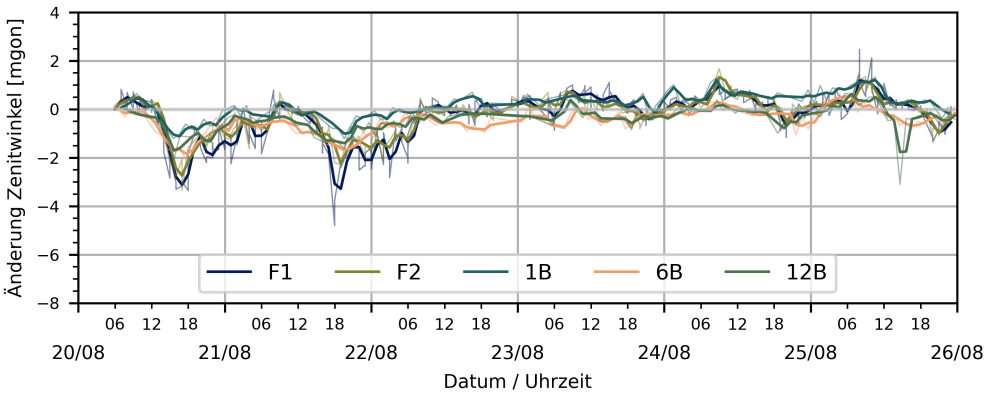


Abb. 5.19.: Zeitreihen der Zenitwinkeländerungen - erfasst mittels Totalstation.

fraktion im Messgebiet leistet. Daher werden Wetterdaten mit den Messwerten des Laserscanners in Bezug gesetzt, um mögliche Korrelationen zu identifizieren. Trotz des Wissens, dass der Temperaturgradient der Schlüssel zur Bereitstellung einer effizienten Korrektur darstellt, stehen in diesem Experiment diese Parameter nicht zur Verfügung. Es wurde jedoch ein räumliches Netz verteilter meteorologischer Sensorik installiert, das Temperatur- und Luftdruckgradienten in Bezug zum Querschnitt des Tals sowie die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit erfasst. Zusätzlich werden Daten über die Globalstrahlung von der ZAMG in Österreich verwendet, die eine Aussage über die Sonneneinstrahlung geben. Bei heterogener Topographie beeinflusst die Baroklinität den täglichen Zyklus der Strahlungs- und Energiebilanz und somit ebenfalls die refraktiven Effekte auf die Messwerte (Kap. 2.5.2). Aus diesem Grund wird neben den Wetterdaten die Topographie entlang der Visuren - vom Laserscanner ausgehend zu den jeweiligen Prismen - untersucht.

Abbildung 5.20 zeigt die verschiedenen meteorologischen Parameter im Valsertal bzw. an der Messstation «STEINACH», von der Daten über die Globalstrahlung an den jeweiligen Tagen dokumentiert sind. Bei allen Parametern ist eine Abhängigkeit von der Tageszeit zu erkennen. Ausgehend von der Globalstrahlung lassen sich Rückschlüsse auf die Sonneneinstrahlung treffen. Die parabelähnliche Struktur der Daten am 21.08.2020 deutet auf einen wolkenfreien, ungestörten Sonnenschein von Sonnenauf- bis untergang im Messgebiet hin. Am 20. und 22.08.2020 ist die Parabel jeweils halbiert und eine nahezu ungestörte Sonneneinstrahlung in das Tal beginnt (20.08.2020) oder endet gegen Mittag (22.08.2020). Während am 20.08.2020 eine sich auflösende Bewölkung vermuten lässt, ist am 22.08. von einsetzendem Regen/Gewittern auszugehen, da zu diesem Zeitpunkt die relative Luftfeuchtigkeit rapide auf 100 % ansteigt. An den Tagen mit Sonnenschein zeigen die Temperaturen an «METEO04» (Am Fels im Südhang) und «METEO05» (Auf einer Wiese in der Talsohle) höhere Messwerte sowie ein hohes Messrauschen gegenüber den restlichen Sensoren an. «ET01» bis «ET04» sind zwar ebenfalls im Südhang installiert, allerdings im Schatten unterhalb der Bäume angebracht. «METEO06» an der Messhütte ist nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt und in einer Höhe von etwa 2 m installiert. Die Beziehung der Temperatur im Tal zur Sonneneinstrahlung ist daran zu erkennen, dass am 20.08.2020 ein steiler Anstieg der Temperaturkurve nach dem Einsetzen des Sonnenscheins zu erkennen ist. Ähnlich ist es am 21.08.2020 nach dem Sonnenaufgang und umgekehrt am 22.08.2020

durch die allgemeine Abkühlung beim Einsetzen des Regens. Die Abkühlung im Tal nach dem Sonnenuntergang erfolgt an sonnigen Sommertagen exponentiell und nicht sprunghaft. Einem Minimum der Temperaturen wird sich erst gegen Morgen angenähert.

Ein weiterer Indikator für die Variation des Mikroklimas im Valsertal ist der Luftdruck. Nach Geiger (1942) wirkt sich die Geländegestaltung dadurch auf das lokale Klima aus, dass geneigter Boden durch die Sonne eine andere Wärmemenge empfängt als ebener Boden. Das Ausmaß der Erwärmung hängt von der orographischen Gestaltung, also der Exposition eines Geländes ab. Daneben ist das Expositionsklima von der Tageszeit, Jahreszeit und der Bewölkung abhängig (Geiger, 1942). Auf Grundlage dieser meteorologischen Eigenschaften werden nach Malberg (2007) in Gebirgsgegenden Berg- und Talwinde sowie Hangauf- und abwinde nachgewiesen. Die Ursache des Hangauf- und Hangabwinds liegt nach Malberg (2007) darin, dass sich die am Tage in den Berghängen aufliegende Luft stark erwärmt, während die in gleicher Höhe über dem Talboden befindliche Luft kühler ist. Die geringere Dichte von warmer Luft sorgt für den Auftrieb der Luftmassen an den Hängen. Nachts wird dagegen die auf dem Hang aufliegende Luft stark abgekühlt, während die Luft im gleichen Höhenniveau über dem Tal relativ warm bleibt (Malberg, 2007). Kalte Luft sammelt sich in der Talsohle. Neben der Exposition, die lokal stark variieren kann, ist die Beschaffenheit der Unterlage (bspw. Vegetation oder Bitumen) entscheidend. Diese Wetterphänomene treten nicht nur quer, sondern auch längs zum Tal auf. Das Längsprofil eines Tals weist eine gewisse Neigung auf, sodass durch unterschiedliche Erwärmung der Tal- und Höhenlagen am Tag Bergwinde und in der Nacht Talwinde entstehen. Bei ruhigen Wetterlagen ist am Tage ein talaufwärts gerichteter Wind zu beobachten, der auf die Bildung sogenannter Hitzetiefs deutet. Die Daten des Luftdrucks in Abbildung 5.20 zeigen dieses Phänomen deutlich. An allen drei Stationen ist ab dem späten Vormittag ein gleichartiger Druckabfall sichtbar, der am 20. und 21.08.2020 deutlich ist und sich am 22.08.2020 noch erahnen lässt. Im Gegensatz dazu sind Hangauf- und abwinde durch lokale, eng begrenzte Luftdruckunterschiede gekennzeichnet. Daher werden in in Abbildung 5.21 die Luftdruckunterschiede der drei Stationen untereinander dargestellt. Die Unterschiede werden jeweils ausgehend von «METEO04» und «METEO06» im Vergleich zu «METEO05» dargestellt. Der grundsätzlich parallele Verlauf der beiden Zeitreihen mit einem negativen Offset weist die unterschiedliche Höhenlage der Sensoren entsprechend der barometrischen Höhenformel nach (Foken, 2016). Am 20. und 21.08.2020 ist der Luftdruck an der Station «METEO06» am späten Nachmittag jeweils höher als an der Station in der Talsohle («METEO05»), sodass von einem wärmebedingten Auftrieb der Luft in den Hangbereichen auszugehen ist. Am 22.08.2020 geht der Sonnenschein über die Mittagsstunden nicht hinaus und der Effekt tritt nicht in gleicher Ausprägung auf. Die hier dargestellten Erkenntnisse zu den meteorologischen Parametern treten am 25.08.2020 in ähnlicher Form auf. Änderungen der Luftdruckunterschiede und daraus resultierend Auftriebseffekte treten vor allem dann auf, wenn es am Nachmittag zu ungestörtem Sonnenschein kommt. Am 23. und 24.08.2020 können die beschriebenen Effekte aufgrund mangelnder Sonneneinstrahlung nicht nachgewiesen werden.

Den meteorologischen Daten (Abb. 5.20 und 5.21) werden in einem weiteren Schritt die Messwerte des Laserscanners (Abb. 5.18) sowie die der Totalstation (5.19) gegenübergestellt. Visuell ist vor allem beim Vergleich der Zenitwinkeländerungen mit den Änderungswerten des Luftdrucks (5.21) eine hohe Übereinstimmung zu erkennen. Bei

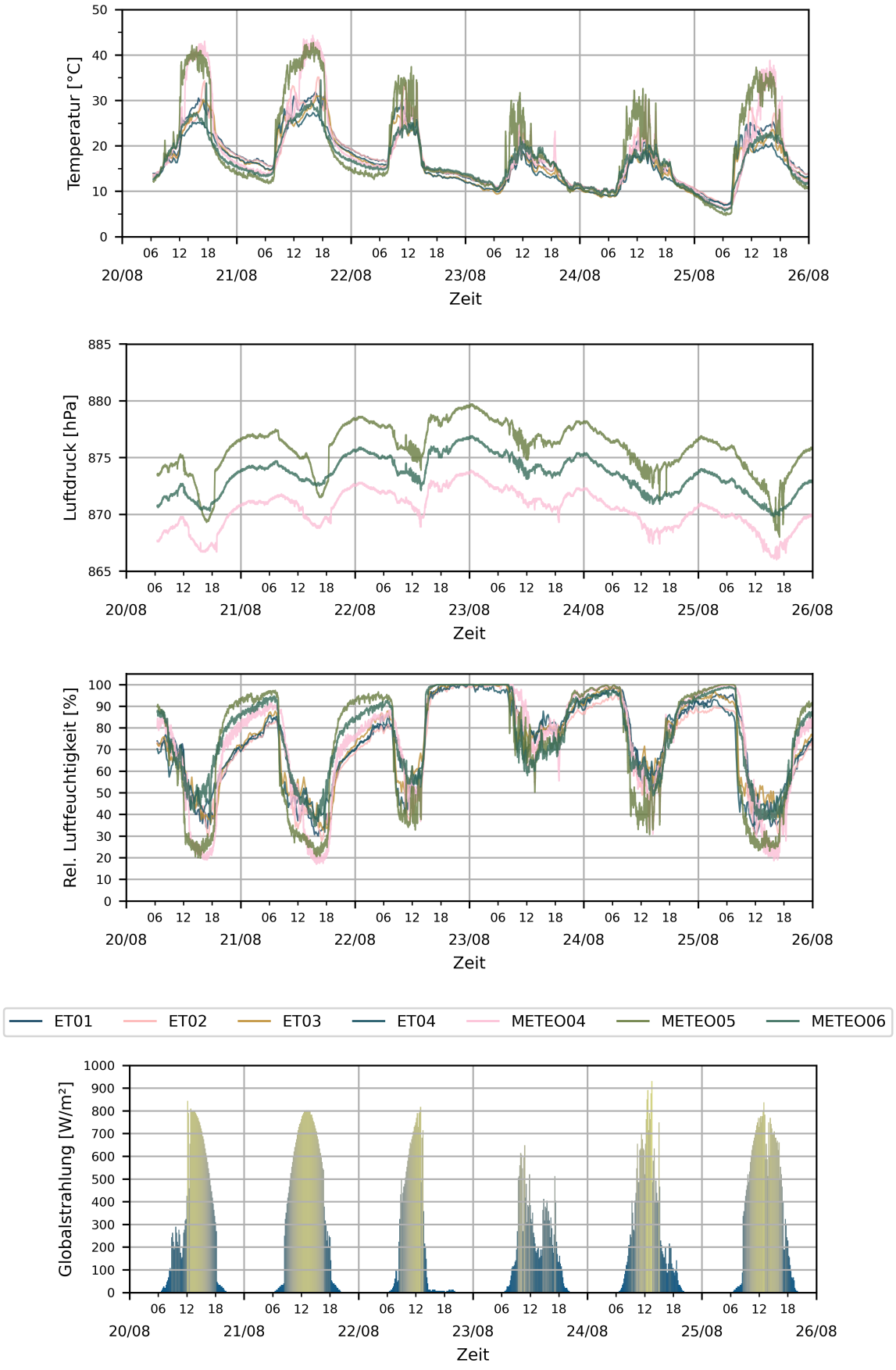


Abb. 5.20.: Meteorologische Daten (Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit) an den Stationen im Messgebiet sowie die Globalstrahlung an der Wetterstation «STEINACH» eingefärbt von dunkel (wenig Strahlung) nach hell (viel Strahlung).

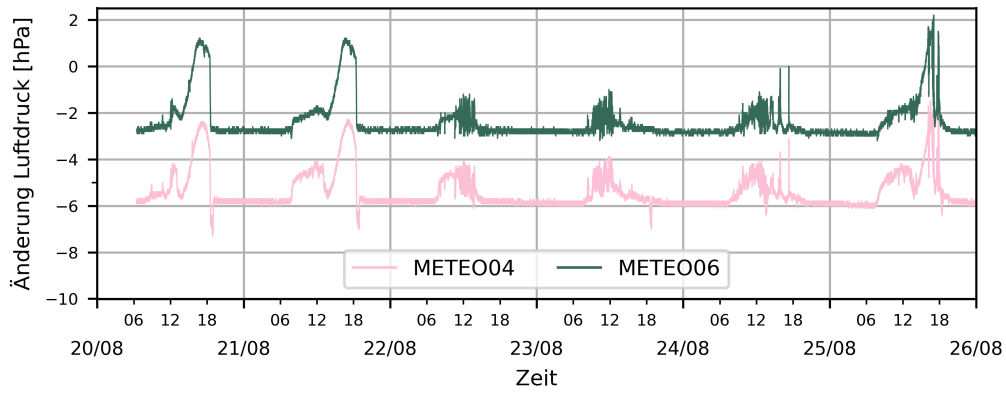


Abb. 5.21.: Differenz des Luftdrucks von «METEO04» und «METEO06» im Vergleich zu «METEO05».

der Berechnung von Korrelationskoeffizienten am 20. und 21.08.2020 zwischen der Zenitwinkeländerung des Laserscanners zu Prisma «F1» sowie der Temperatur und der Luftdruckänderung wird bestätigt, dass die beiden meteorologischen Parameter keine unabhängigen Variablen zur Erklärung der Winkelabweichung darstellen. Werte zwischen $r = -0,58$ bis $r = -0,79$ zeigen eine hohe Korrelation aller Variablen. Aus den Korrelationswerten alleine lassen sich keine kausalen Zusammenhänge ermitteln. Deshalb erfolgt eine detailliertere Betrachtung der Parameter. Aus Abbildung 5.22 heraus wird exemplarisch eine kausale Interpretation für den 20. und 21.08.2020 hergeleitet. Der Umstand wird in der Weise skizziert, dass die Zeitreihe der Zenitwinkeländerung für den Punkt «F1» zusammen mit der Änderung des Luftdrucks und der Temperatur von «METEO04» und «METEO06» im Vergleich zu «METEO05» dargestellt wird. Es erfolgt eine Generalisierung der Parameter, indem die Temperatur grün und der Luftdruck blau visualisiert werden. Die absoluten Messwerte und die Relationen der Werte zwischen den einzelnen Stationen sind für diese Interpretation nicht wichtig, was die Generalisierung rechtfertigt.

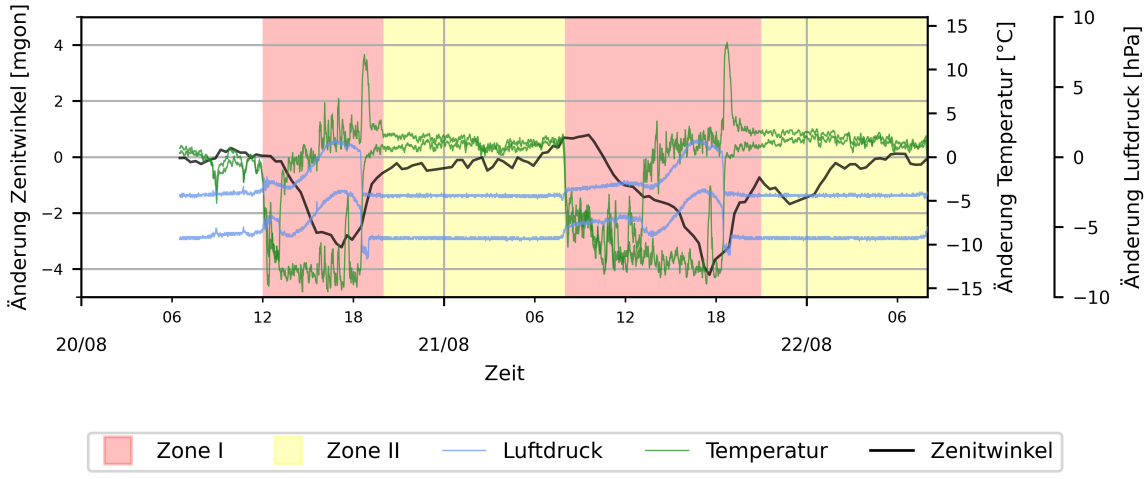


Abb. 5.22.: Vergleichende Darstellung der Zenitwinkeländerung an Prisma «F1» zusammen mit der Änderung von Temperatur und Luftdruck als Differenz der Stationen «METEO04» und «METEO06» gegenüber der Station «METEO05» am 20. und 21.08.2020.

Die Form der Zeitreihe der Zenitwinkeländerung an Prisma «F1» nimmt an den beiden dargestellten Tagen eine U- bzw. V-Form an und erreicht jeweils ein Minimum kurz vor 18:00 Uhr. Es ist zu sehen, dass sowohl der Luftdruck als auch die Temperatur während dieser Formbildung starken Variationen unterworfen sind, was auf eine turbulente Atmosphäre im Tal hindeutet. Am 20.08.2020 beginnen die Variationen gegen 12:00 Uhr, was mit dem einsetzenden Sonnenschein korrespondiert (Abb. 5.20), und am 21.08.2020 beginnen sie direkt nach Sonnenaufgang. Das Ende wird jeweils nach Sonnenuntergang erreicht. Die Änderung des Zenitwinkels setzt am Morgen mit einer Verzögerung von etwa 90 Minuten ein. Das Minimum des Zenitwinkels ist nahezu identisch mit der maximalen Änderung des Luftdrucks gegen 18:00 Uhr. Nachdem die Sonne gegen 18:00 Uhr nicht mehr direkt ins Tal scheint, passt sich der Luftdruck rapide wieder seinem Normalniveau an. Die Variationen in den Temperaturunterschieden enden mit dem Sonnenuntergang. Dieser Zeitraum mit den Variationen wird an dieser Stelle als «Zone I» betitelt und ist in der Abbildung 5.22 rot markiert. Luftdruckunterschiede im Talquerschnitt, die aufgrund der nicht gleichförmigen Erwärmung der einzelnen Hangbereiche auftreten, sind die treibenden Kräfte für die starken Änderungen des Zenitwinkels. Das absolute Minimum des Zenitwinkels ist am 20.08.2020 geringer als am 21.08.2020, da die Erwärmung durch die Sonne gegenüber dem 21.08.2020 erst später am Tag einsetzt (Abb. 5.20). Nachdem die Sonnenenergie nicht mehr ausreicht, den Auftrieb warmer Luft in den Hängen aufrechtzuerhalten, ist die Zenitwinkeländerung stark rückläufig. Gegen 20:00 Uhr am 20.08.2020 bzw. 21:00 Uhr am 21.08.2020 wird der Übergang in einen weiteren Bereich (Zone II) vollzogen. Der Übergang zeichnet sich dadurch aus, dass ein signifikanter Wechsel in der Änderungsrate der Zenitwinkel zu sehen ist und die Variationen der meteorologischen Parameter beendet sind. In Abbildung 5.20 und 5.22 ist nach den warmen, sonnenreichen Sommertagen ein Übergang zu einer stabilen vertikalen Temperaturschichtung zu erkennen. Die Sensoren zeigen kältere Luft in der Talsohle, die von darüberliegenden warmen Luftpaketen überlagert wird, an. Im Mittel weisen die Temperaturkurven aller Sensoren ein exponentielles Absinken auf, das gegen Morgen ein Minimum erreicht. Parallel dazu strebt die Zenitwinkeländerung gegen Null. Am Ende dieses Abschnitts wird behauptet, dass die Zenitwinkeländerung an den zwei exemplarisch ausgewählten Tagen zwei Ursachen hat. Zum einen turbulente, atmosphärische Bedingungen an warmen, sonnenreichen Sommertagen und zum anderen eine deutliche vertikale Temperaturschichtung mit einem positiven Gradienten während der Nacht. Die gewonnenen Erkenntnisse werden auf die anderen Tage im Beobachtungszeitraum adaptiert. Am 22., 23. und 24.08.2020 sieht man, dass aufgrund fehlender Sonnenstunden die Energie nicht ausreicht, ähnliche Prozesse in Gang zu setzen. Demgegenüber weisen am 25.08.2020 die Variationen der meteorologischen Parameter tagsüber ein ähnliches Verhalten auf, wie es am 20. und 21.08.2020 in «Zone I» der Fall ist. Eine korrespondierende Zenitwinkeländerung setzt jedoch erst später am Tag ein, was darauf schließen lässt, dass die Sonnenenergie nicht ausreicht, die notwendigen turbulenten Verhältnisse im Tal herzustellen. Bei Betrachtung von Abb. 5.20 fällt auf, dass am Morgen des 25.08.2020 Tiefsttemperaturen von etwa $5°C$ herrschen, was im Beobachtungszeitraum einem absoluten Minimum entspricht. Es wird vermutet, dass ein Teil der Sonnenenergie zur generellen Erwärmung des Tals aufgebraucht wird. Notwendige Temperaturen zur Initiierung der turbulenten Prozesse werden erst später am Tag erreicht, sodass die Magnitude in der Zenitwinkeländerung nicht vergleichbar zum 20. und 21.08.2020 ist.

Die Änderungen der Zenitwinkel (Abb. 5.18 und 5.19) werden durch atmosphärische Refraktion verursacht. Nach Brocks (1939) ist der Refraktionswinkel (Gl. 2.22) als integrale Summe aller Krümmungen entlang der Wegstrecke eines Messstrahls anzusehen (Kap. 2.5.2). Jede Krümmung ist abhängig von einem lokalen Refraktionskoeffizienten (Gl. 2.20), der wiederum von lokalen Temperaturgradienten abhängt. Die Variation dieser Werte kann in alpinen Umgebungen komplex sein und ist nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft messtechnisch nur mit hohem Aufwand zu erfassen. Nachdem die beeinflussenden meteorologischen Faktoren auf die Winkeländerung vorgestellt wurden, wird daher im Folgenden der Einfluss der Topographie aus geometrischer Sicht gezeigt. In Kapitel 2.5.2 wurde dargestellt, dass im ersten und zweiten Viertel der Wegstrecke eines Messstrahls 75 % des refraktiven Einflusses zustande kommen. Bei den ersten 10 % des Strahles werden 19-mal stärkere Refraktionsänderungen verursacht als solche im letzten Zehntel. Zusätzlich ist der Aufbau der Atmosphäre entscheidend. So ist zum einen die untere Bodenschicht bis 3 m durch starke Turbulenzen bei Sonneneinstrahlung gekennzeichnet und zum anderen ist der Temperaturgradient in der Prandtl-Schicht (bis 30 m) stark von der Erwärmung der Erdoberfläche abhängig. Auf Basis der in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Theorie werden nachfolgend entlang der Querprofile (Abb. 5.13) zwischen Laserscanner und den Prismen Vertikalschnitte gebildet (Abb. 5.23 und 5.24). Entlang des Messstrahls wird die Strecke geviertelt und die ersten 10 % werden dargestellt. Zusätzlich wird die Höhe des Strahlverlaufs über der Erdoberfläche berechnet. Eine Höhe von < 3 m (Untere Bodenschicht nach Kap. 2.5.2) wird als «sehr kritisch» betrachtet und in den Schnittzeichnungen als rote Fläche markiert. Verläuft der Messstrahl in einer Höhe > 3 m und < 30 m über der Erdoberfläche (Prandtl-Schicht nach Kap. 2.5.2), wird dieser Bereich als «kritisch» betrachtet und im Vertikalschnitt gelb markiert.

Die Vertikalschnitte werden in zwei Teilen präsentiert. Zunächst die Profile zu den Punkten «F1» und «F2», die in einem Zenitwinkel > 100 gon im Tal liegen (Abb. 5.23), und dann die Punkte «1B», «6B » und «12B», die in einem Zenitwinkel < 100 gon im Hang installiert sind (Abb. 5.24). In der linken Spalte werden die Vertikalschnitte gleich skaliert in einer Übersicht dargestellt, damit die Proportionen zwischen den einzelnen Schnitten untereinander erkennbar sind. Die rechte Spalte zeigt jeweils eine vergrößerte Darstellung, in der sich auf die ersten beiden Viertel des Messwegs und den Höhenverlauf zwischen Topographie und Messstrahl konzentriert wird.

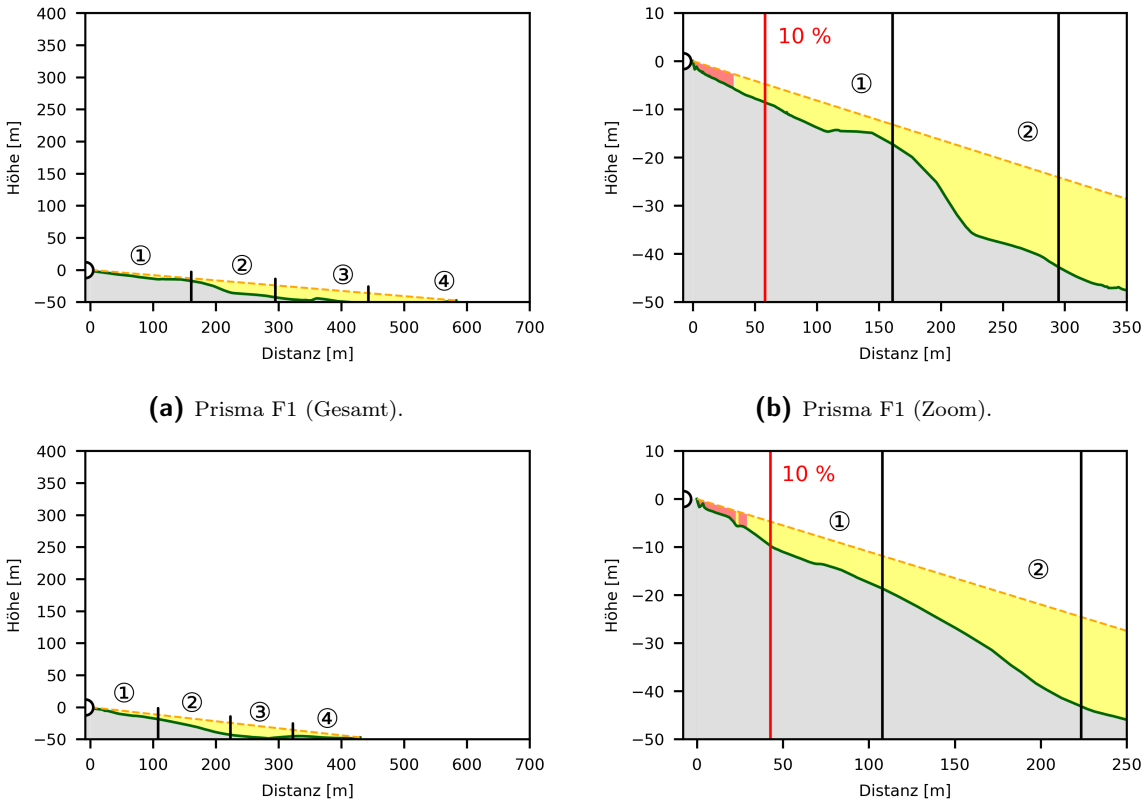
Bei den Abbildungen 5.23a und 5.23c ist ein flacher Strahlverlauf zu den Punkten «F1» und «F2» erkennbar. Die Abbildungen 5.23b und 5.23d zeigen zudem, dass die ersten beiden Viertel innerhalb des kritischen Bereichs (< 30 m) liegen. Bei den beiden Profilen ist der Bereich mit «sehr kritischen» Höhenunterschieden bis zu einer Distanz von etwa 33 m, ausgehend vom Laserscanner, vorhanden und nimmt damit einen entsprechenden Anteil im Streckenabschnitt bis 10 % ein (Tab. 5.9). Im Vertikalschnitt zu Punkt «F1» ist außerdem bei einer Distanz von etwa 150 m eine weitere Bruchkante zu sehen, an der lediglich mit einer Höhe von nur knapp über 3 m vorbei gemessen wird (Abb. 5.23b). Diese Struktur kann bei auftretenden Hangwinden als problematisch auf die Zenitwinkelmessung angesehen werden.

Abbildung 5.24 zeigt im Gegensatz dazu eine zunehmend unkritischere Topographie. Die kritischen Bereiche werden von Abb. 5.24b nach 5.24f weniger und überschreiten nur bei der Visur zu Punkt «1B» die 10 %-Grenze und endet dort nach ca. 78 m. Bei der Messung zum Prisma «6B» ist der kritische Bereich bereits nach 52 m und

bei der Messung zu Punkt «12B» nach 43 m verlassen. Im Vergleich zu Tabelle 5.9 und auf Grundlage der Literaturrecherche sowie den Beschreibungen in Kapitel 2.5.2 kann daher bestätigt werden, dass mit zunehmender Höhe der Visur über der Erdoberfläche Einflüsse durch atmosphärische Refraktion abnehmen. Die Abnahme kritischer Bereiche in den Abbildungen 5.23 und 5.24 ist proportional zu den Magnituden der Zenitwinkeländerungen der jeweiligen Prismen in Abbildung 5.18.

Tab. 5.9.: Zusammenfassung der Länge von den einzelnen Streckenabschnitten nach 10 % und den jeweiligen Vierteln entlang der Messlinien zu den Prismen «F1», «F2», «1B», «6B» und «12B». Streckenangaben in [m].

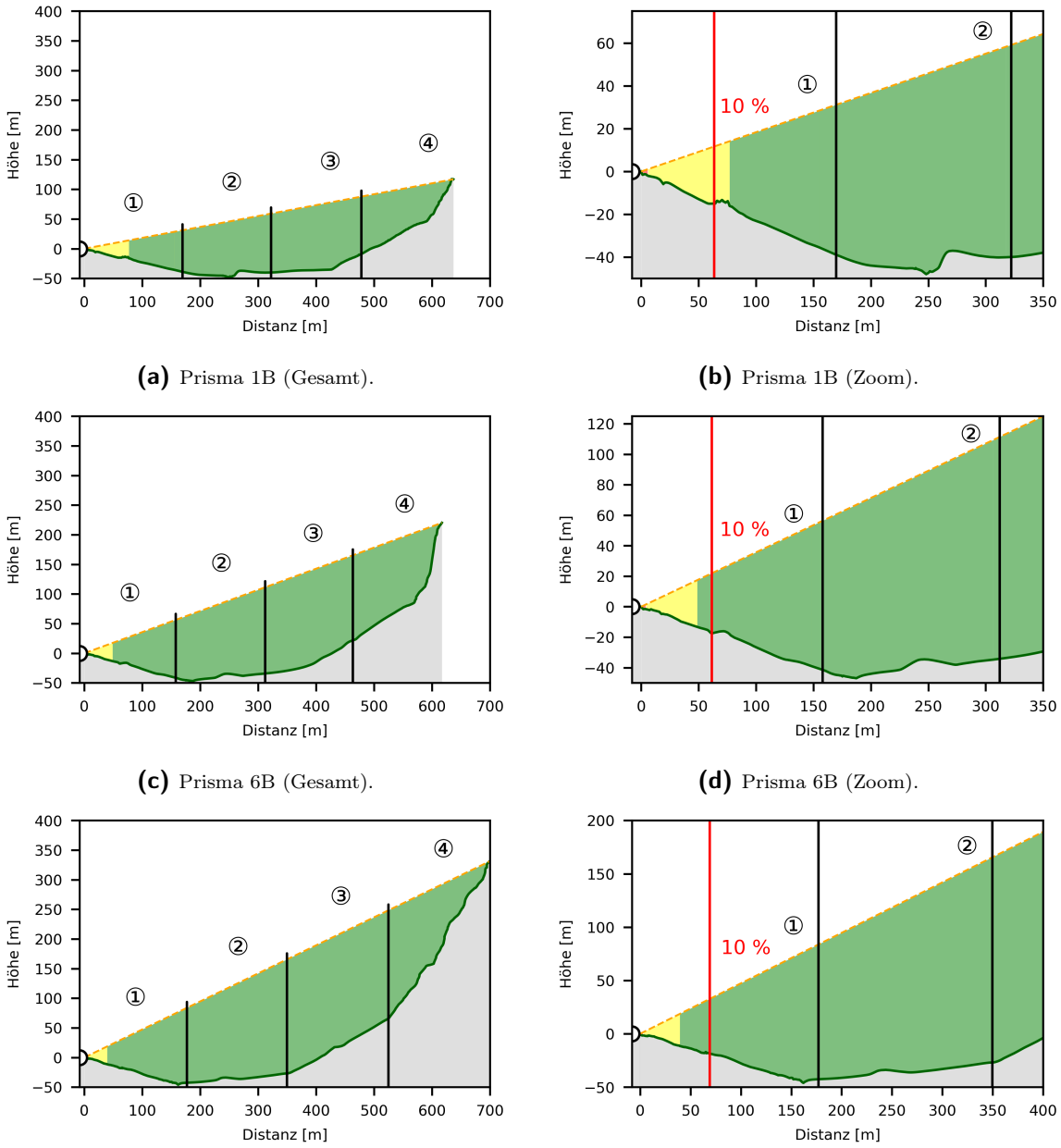
Prisma	**Streckenabschnitt**				
	10 %	**25 %**	**50 %**	**75 %**	**100 %**
F1	58,504	146,260	292,521	438,781	585,041
F2	43,270	108,174	216,348	324,522	432,697
1B	64,742	161,854	323,708	485,562	647,416
6B	65,505	163,762	327,524	491,286	655,048
12B	77,299	193,247	386,494	579,741	772,955



(a) Prisma F1 (Gesamt). **(b)** Prisma F1 (Zoom).

(c) Prisma F2 (Gesamt). **(d)** Prisma F2 (Zoom).

Abb. 5.23.: Messdaten in Bezug zur Topographie im Valsertal. Vertikalschnitte entlang der Querprofile (Abb. 5.13) - Teil I. Links: Vertikalschnitt des gesamten Messwegs, gleichartig skaliert. Rechts: Zoom auf die ersten beiden Viertel im Vertikalschnitt und Darstellung der ersten 10 % des Messwegs.



(a) Prisma 1B (Gesamt).

(b) Prisma 1B (Zoom).

(c) Prisma 6B (Gesamt).

(d) Prisma 6B (Zoom).

(e) Prisma 12B (Gesamt).

(f) Prisma 12B (Zoom).

Abb. 5.24.: Vertikalschnitte entlang der Querprofile (Abb. 5.13) - Teil II. Links: Vertikalschnitt des gesamten Messwegs, gleichartig skaliert. Rechts: Zoom auf die ersten beiden Viertel im Vertikalschnitt und Darstellung der ersten 10 % des Messwegs.

5.3.2.3. Zusammenfassung und Diskussion

Motiviert von den Arbeiten von Friedli et al. (2019), wird in diesem Kapitel ein Ansatz vorgestellt, der die Einflüsse atmosphärischer Refraktion auf die Messergebnisse eines permanent installierten Laserscanners im Valsertal zeigt. Problematisch ist zunächst, dass sich systematische Effekte in den Messdaten, die beispielsweise einer nicht berücksichtigten Pfeilerbewegung entstammen, von Einflüssen atmosphärischer Natur nicht ohne Weiteres trennen lassen. Die beiden Einflussgrößen müssen durch eine entsprechende Messanordnung voneinander separiert werden. In dem hier vorliegenden Fallbeispiel gelingt die Korrektur einer nachgewiesenen Pfeilerbewegung durch zusätzlich installierte Neigungssensoren. Trotzdem ist der Messaufbau kritisch zu betrachten und für weitere Untersuchungen zu optimieren, da bspw. der Sensor «Neigung 1» (Abb. 5.15) unzureichende Daten geliefert hat. Es wird allerdings weiterhin eine direkte physische Verbindung der Neigungssensorik zum Laserscanner empfohlen, da dessen Bewegungsmuster für eine optimale Korrektur bekannt sein muss. Des Weiteren ist in Zukunft die Frage zu diskutieren, ob weitere Parameter wie die Translation auf allen drei Koordinatenachsen oder die Rotation um die Z-Achse zu berücksichtigen sind. Der Datenausschnitt von lediglich sechs Tagen gibt hier keine Hinweise.

Am 20. und 21.08.2020 werden deutliche Veränderungen der Zenitwinkel mittels Laserscanner und Totalstation bestätigt, wobei es Differenzen in der Magnitude gibt. Im weiteren Verlauf der Messwerte über den ausgewählten Zeitraum werden durch den Laserscanner, insbesondere an Punkt «F1», weitere plausible Veränderungen dargestellt, die sich durch die vor Ort dokumentierten meteorologischen Daten erklären lassen. Die Totalstation bestätigt am 22., 23. und 24.08.2020 diese Daten nicht. Die Datengrundlage, die als Basis für den Vergleich dient, ist daher ebenfalls kritisch zu hinterfragen und es entstehen forschungsrelevante Fragestellungen für die Zukunft. Zum einen ist die Auswirkung des Abtastintervalls beider Systeme auf die Detektion von Zenitwinkeländerungen zu untersuchen (i). Während mit dem Laserscanner im Durchschnitt alle 20 Minuten Daten erfasst werden, erfolgt dies bei der Totalstation nur einmal pro Stunde. Darüber hinaus sind die Erfassungstechniken beider Systeme hinsichtlich der Sensitivität zur Detektion relevanter Änderungen zu prüfen (ii). Beim Laserscanner wird ein Prisma in einem hochauflösenden Raster, bestehend aus mehreren tausend Messungen, in kurzer Zeit detektiert (Kap. 5.2.1), wohingegen die Totalstation das Prisma mittels einer Einzelmessung messtechnisch erfasst. Außerdem ist es kritisch zu bewerten, dass der Laserscanner nur annähernd horizontal auf dem Messpfeiler angebracht ist. Eine Auswirkung von der Abweichung der Z-Achse des SOCS gegenüber der lokalen Lotlinie ist bezüglich der abgeleiteten Zenitwinkel abzuschätzen (iii). Ein weiterer Kritikpunkt liegt in der Auswertung der Zeitreihen an sich. Willkürlich sind alle Messungen des Laserscanners und der Totalstation auf den 20.08.2020 um 6:00 Uhr referenziert. Dieser Zeitpunkt kurz vor Sonnenaufgang wird ohne zusätzliches Wissen als Zeitraum mit stabilen atmosphärischen Bedingungen vermutet. Da dies an dieser Stelle nicht nachgewiesen ist, können in der Auswertung nur relative Veränderungen und keine absoluten Winkeländerungen dargestellt werden. Zukünftig wäre daher eine Soll-Geometrie mit höherer Genauigkeit herzustellen, mit der die Daten verglichen werden (iv), oder es sind Zeitpunkte mit stabilen atmosphärischen Bedingungen nachzuweisen (v).

Dieses Kapitel zeigt ebenfalls, dass neben dem Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht (Kap. 2.5.2) die Topographie im Messgebiet von wesentlicher Bedeutung ist. Die Exposition eines Talquerschnitts, daraus ableitend die unterschiedliche Erwärmung

einzelner Hangbereiche und daraus wiederum resultierend die Energiebilanz, sind nach Serafin et al. (2018) der wichtigste Faktor für die zeitliche und räumliche Variabilität der atmosphärischen Grenzschicht. In dem vorgestellten Fallbeispiel sind punktuell Messsensoren verteilt, die Hinweise auf turbulente Gegebenheiten im Tal geben. Die Sensoren zeichnen jedoch beispielsweise nur einen vertikalen Temperaturgradienten des gesamten Querschnitts auf und keine lokalen Temperaturgradienten, die maßgeblichen Einfluss auf die lokalen Refraktionskoeffizienten haben. Mit der vorliegenden Messanordnung lässt sich zwar die zeitliche Variabilität des Mikroklimas im Tal nachweisen, die sich auch in Korrelation mit den Messwerten des Laserscanners setzen lässt (Abb. 5.22), aber detaillierte Aussagen über die zugrundeliegenden mikrometeorologischen Prozesse lassen sich nicht herleiten. Nach De Wekker und Kossmann (2015) hat der technische Fortschritt verschiedenster Sensorik in den letzten Jahren maßgeblich zum besseren Verständnis mikrometeorologischer Prozesse innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht in alpinen Umgebungen beigetragen. Daher ist im Sinne der Erforschung des Mikroklimas in Alpentälern in Zukunft ein räumlich hochauflösenderes Messnetz zu wählen. So lassen sich lokal Bereiche detektieren, die maßgeblichen Anteil an den Prozessen haben. Außerdem wird empfohlen, den Temperaturgradienten sowie die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung an verschiedenen Positionen im Tal für tiefergehende Untersuchungen zu erfassen.

Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse sind - streng genommen - nur für die Messanordnung im Valsertal gültig. Zusätzlich sind die Erkenntnisse nur zu der Jahreszeit gültig, während der die Datenerfassung stattgefunden hat einschließlich der entsprechenden Sonnenstunden, des Sonnenstands über dem Tal sowie des Vegetationsgrad der Unterlage. Es wurde eine Methode vorgestellt, die nur einen Teil der zur Verfügung stehenden Daten nutzt. Eine Erweiterung der Analyse auf den gesamten Datensatz (Tab. 5.8) wird einen weiteren Erkenntnisgewinn liefern und das auch zu anderen Jahreszeit und Wetterbedingungen. Eine Adaption des hier generierten Wissens auf andere Messgebiete ist nur begrenzt möglich. Ist die Mikrometeorologie jedoch in Bezug zur lokalen Topographie verstanden, liefert dieser Datensatz wertvolle Hinweise darauf, welche Parameter bei der Berücksichtigung von Refraktion relevant sind. Grundsätzlich ist, wie in der geodätischen Praxis üblich, weiterhin die Aussage gültig, dass Visuren in geringen Höhen und entlang von Böschungskanten aufgrund erhöhter thermischer Aktivität zu vermeiden sind. Diese Aussage ist jedoch nur für bestimmte Zeitpunkte unter dem Einfluss bestimmter meteorologischer Parameter gültig. Auf Basis dieses Kapitels ist ein enormes Potential erkennbar, dass sich zukünftig Messdaten eines Laserscanners unter dem Einfluss von Meteorologie und Topographie zeitlich variabel simulieren lassen. Eine Simulation könnte bspw. auf der Basis des Projektes HELIOS++ (Winiwarter et al., 2022b) vollzogen werden. Simulationen können vorab in die Standortplanung eines TLS im Zuge einer Monitoringkonzeption mit einfließen, sodass im Vorfeld Bereiche detektiert werden, die es zu bestimmten Tageszeiten aus der Auswertung auszuschließen gilt, um Fehlinterpretationen in den Messdaten zu vermeiden. Relevante Parameter für eine effiziente Simulation, die es in Zukunft zu analysieren gilt, sind bspw. der Sonnenstand in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit oder die Exposition und Oberflächenbeschaffenheit einzelner Hangbereiche. Nicht nur zur Simulation von Messdaten eines Laserscanners, sondern auch während eines laufenden Monitoringprojektes ist es zukünftig vorstellbar, dass beim Eintreten bestimmter meteorologischer Verhältnisse Teile der Scandaten ausgeschlossen oder als weniger zu-

verlässig markiert werden. Eine mögliche Anwendung wäre die automatisierte Anpassung von Signifikanzniveus zur Vermeidung von Fehlalarmierungen bei einer Überwachungsaufgabe, aber mit gleichzeitiger Rückmeldung an den Anwender, dass in einem bestimmten Bereich, während eines bestimmten Zeitraums, Bewegungen nur noch ab einem bestimmten Betrag detektiert werden können. Dieses Vorgehen könnte analog auch in einen weiteren Anwendungsfall einfließen, sodass zu bestimmten Tageszeiten keine datenbasierte Registrierung bzw. Georeferenzierung einzelner Scans stattfindet, sondern während dieser Zeiträume durch eine direkte Registrierungsmethode am Laserscanner selbst unter Zuhilfenahme von Neigungssensorik und/oder GNSS-Sensorik stattfindet.

5.3.3. Einfluss von Registrierungsparametern auf die Messergebnisse eines PLS

Bei den Untersuchungen zu den atmosphärischen Einflüssen in Kapitel 5.3.2 werden bereits Pfeilerbewegungen nachgewiesen, die sich als systematische Abweichung in den Zeitreihen der Koordinaten aus der Prismendetektion niederschlagen. Der Einsatz von PLS innerhalb von Überwachungsaufgaben ist allerdings nur dann gültig, wenn alle Scans und deren Analysemethoden sich auf ein einheitliches Koordinatensystem beziehen. Die Bedeutung eines sachgerechten Vorgehens während dieses Prozesses sowie gängige Methoden sind in Kapitel 2.5 ausführlich dargestellt. Daher werden in diesem Kapitel systematische Effekte untersucht, die aus einer mangelnden Registrierung von Punktwolken entstehen. Die hier vorgestellte Untersuchung bezieht sich auf Langzeiteffekte, die nach mehreren Tagen bis Wochen während einer permanenten Installation auftreten. Lokale Effekte auf räumlicher Skala oder zeitliche Artefakte mit einer Frequenz von weniger als 24 Stunden bleiben in dieser Fallstudie außer Acht.

5.3.3.1. Datenbeschreibung und Methodik

Für diese Studie wurden Daten vom 29.07.2021 bis zum 31.10.2021 aus der dritten Messkampagne (M3) verwendet (Tab. 5.8). In dieser Kampagne ist eine Messreihe mit einer längeren Laufzeit vorhanden, sodass die Beobachtung von langzeitlichen Effekten ermöglicht wird. Drei Datenlücken sind während dieser Messkampagne vorhanden, die aber auf die Zielsetzung dieser Auswertung keinen Einfluss haben. Es wurden 19 Prismen in die Auswertung mit einbezogen. Zwei Prismen stehen nach dem Abbau des Monitorings mittels der Totalstation nicht mehr zur Verfügung. Für die vergleichenden Untersuchungen werden zunächst die Zeitreihen der unkorrigierten Koordinaten eines jeden Prismas auf ein Tagesmittel reduziert (i), anschließend relative Veränderungen zu einem Referenzscan am 29.07.2021 um 13:00 Uhr ermittelt (ii) und abschließend für jede Koordinatenachse im scannereigenen Koordinatensystem (SOCS) ein Durchschnittswert berechnet, um globale Auswirkungen auf die Punktwolkendaten zu untersuchen. Innerhalb dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Registrierung multitemporaler Punktwolken gewählt. Zum einen wird die interne Registrierungsmethode am eingesetzten Scanner selbst genutzt (Gaisecker et al., 2012), die nach einem einfachen ICP-Ansatz unter Verwendung der gesamten Punktwolke zur Bestimmung der Transformationsparameter verfährt (Kap. 2.5.1.2). Dazu werden die Distanzen zwischen zwei korrespondierenden Punktwolken minimiert. An dieser Stelle erfolgt keine Klassifizierung oder Segmentierung der Punktwolke, sodass auch nicht stabile Bereiche in die

Analyse miteinbezogen werden. Zum anderen wird auf Basis der Fähigkeit, Prismen aus den Scans zu extrahieren (Kap. 5.2), eine klassische dreidimensionale Helmert-Transformation mittels der im Raum verteilten Messpunkte durchgeführt (Kap. 2.5.1). Während der Untersuchungszeiträume wird die Stabilität aller Prismen angenommen (Abb. 5.10). Aus diesem Grund werden die 19 Prismen jeweils als identische Punkte zur Berechnung der Transformationsparameter verwendet. Analog zum Transformationsansatz mittels ICP werden drei Rotationen und drei Translationen berechnet. Optional lässt sich ein Maßstabsparameter für alle drei Raumachsen bestimmen. Die Bestimmung eines Maßstabsfaktors bietet die Möglichkeit, bei entsprechender Genauigkeit der Referenzgeometrie, bspw. Unzulänglichkeiten bei der Berücksichtigung einer atmosphärischen Streckenkorrektur, aufzudecken. Das Potential einer solchen Analyse ist gegeben, wird aber in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Entsprechend der unkorrigierten Koordinaten werden die registrierten Koordinaten mittels ICP und Helmert-Transformation ebenfalls gemittelt und jede Koordinatenachse vergleichend dargestellt. Neben der Darstellung auf der Zeitskala wird der Einfluss einer jeden Methode mittels räumlicher Kartierung visualisiert. Um die Auswirkungen verschiedener Transformationsparameter auf die sich ergebenden Distanzen zwischen den einzelnen Punktwolken zu veranschaulichen, wurde der Algorithmus M3C2-EP (Winiwarter et al., 2021) zweckentfremdet und auf zwei Punktwolken angewendet, die am 28.07.2021 und 03.10.2021 aufgenommen wurden. Für die Parametrisierung dieses numerischen Beispiels werden ausschließlich Transformationsparameter eingeführt. Dabei wird der Einfluss der Registrierung berücksichtigt und es wird von weiteren Genauigkeitsmaßen abgesehen. Es entsteht eine sogenannte «Impact Map», die M3C2-Distanzen zwischen den zwei ausgewählten Punktwolken auf Basis differierender Transformationsparameter darstellt.

5.3.3.2. Resultate

Die Annahme, dass der Vermessungspfeiler stabil und frei von Bewegungen ist, trifft auch in diesem Fall nicht zu. Es ist erkennbar, dass die unbearbeiteten Daten (Abb. 5.25 - blau) im Laufe der Zeit variieren und zu nicht vernachlässigbaren Abweichungen führen. Analog zu Kapitel 5.3.2 korrelieren die zeitlichen Veränderungen der Koordinaten unter anderem mit den Neigungssensoren am Messpfeiler. Auf der Y-Achse ist zudem deutlich eine lineare Abweichung zu erkennen. Es wird vermutet, dass es zu einer Drehung des Laserscanners um die Vertikalachse kommt. Eine detaillierte Ursachenforschung bleibt in dieser Arbeit allerdings aus. Zusätzlich sind signifikante zeitliche Abweichungen auf der Z-Achse zu erkennen, was die Notwendigkeit einer Datenregistrierung im Vorfeld einer Änderungsanalyse multitemporaler Datensätze aufzeigt.

Auf Basis der ICP-basierten Methodik (Abb. 5.25 - blaugrün) fällt auf, dass nach der Transformation die Werte auf der Y-Achse keine Veränderung vorweisen. Die Linearität in der Zeitreihe ist weiterhin vorhanden. Eine Erklärung für diesen Effekt ist darin zu finden, dass entsprechend der Abbildung 5.11 in Richtung der Y-Achse keine zu vergleichenden Messpunkte vorhanden sind, die eine Information bei der Berechnung der Transformationsparameter liefern. Die Y-Achse verläuft in etwa parallel zur Längsachse des Tals. Auf der X- und Z-Achse ist ein Vorzeichenwechsel zu beobachten. Ab Anfang September 2021 ist trotz Registrierung ein linearer Verlauf der Zeitreihen erkennbar. Dieser lässt sich durch den Umstand erklären, dass mittels der ICP-Methode die komplette Szene für die Registrierung verwendet wird. Dies inkludiert auch diejeni-

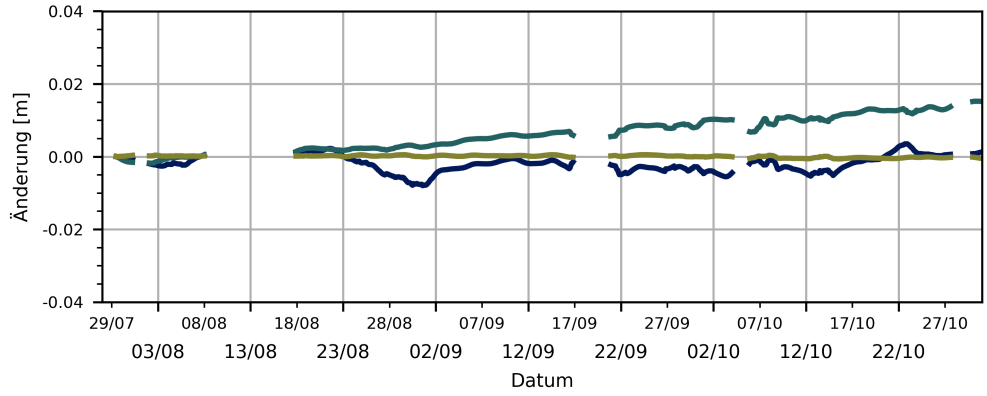
gen Bereiche in der Talsohle, die überwiegend von Wiesen geprägt sind. Im Sinne der Algorithmik wird die Wiesenfläche als ident und unveränderlich vermutet. In der Realität unterliegt Wiese jedoch einem Wachstum und bei entsprechender Bewirtschaftung auch Phasen, in denen sie gemäht ist. Geometrisch gesehen werden Ebenen, die aus der Punktwolke extrahiert werden, in diesem Bereich um einige Dezimeter höher oder tiefer berechnet. Die Nichtberücksichtigung dieses Umstands führt zu Fehlinterpretationen. Bei genauer Betrachtung des Datensatzes fällt auf, dass Anfang September 2021 als auch Anfang Oktober 2021 umfangreiche Mäharbeiten in der Talsohle stattfinden. Die Mäharbeiten bewirken im Datensatz eine Rotation um die Y-Achse in Richtung der Talsohle und sorgen daher für höhere X- und Z-Koordinaten in den Zeitreihen.

Ein alternativer Ansatz zeigt, dass die Klassifizierung von stabilen Bereichen, und bspw. damit verbunden die Exklusion von Bereichen mit Vegetation, im geodätischen Sinne weiterhin relevant ist. Das momentane Fehlen eines automatisierbaren Algorithmus zur Detektion stabiler Bereiche in einem multitemporalen Datensatz kann durch die Möglichkeit der Prismendetektion (Kap. 5.2) kompensiert werden. Die Zeitreihen (Abb. 5.25 - olive) zeigen keine systematischen Abweichungen, sodass das zugrundeliegende mathematische Modell eine adäquate Berücksichtigung stabiler Bereiche demonstriert und daraus ableitend die Notwendigkeit einer Entwicklung in Richtung eines datenbasierten Berechnungsansatzes aufzeigt.

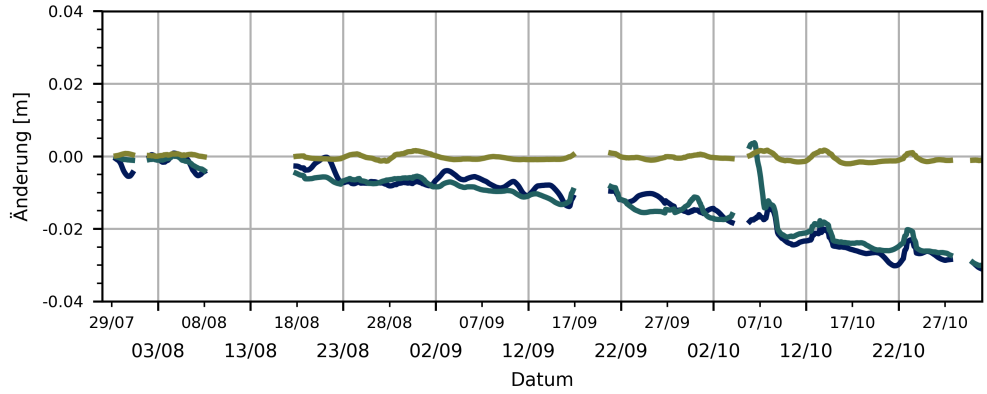
In Abbildung 5.26 wird für jeden der drei vorgestellten Anwendungsfälle eine «Impact Map» dargestellt. Zusätzlich wird der Mittelwert aller Differenzen berechnet und auch in der Skala (Abb. 5.26) markiert. Ein Ergebnis, das frei von systematischen Abweichungen ist, sollte einen Mittelwert um Null haben und entspricht einer zu erwartenden Normalverteilung. Wird keine Transformation durchgeführt, ist eine Tendenz zu höheren Werten erkennbar; dies entspricht im Mittel einer Verschiebung der normalverteilten Abweichungen um 0,015 m (Abbildung 5.26 - [1]). Die Anwendung des scannerinternen Registrierungsalgorithmus zeigt bei einer Vorzeichenumkehr weiterhin systematische Abweichungen. Der Mittelwert liegt bei -0,008 m (Abbildung 5.26 - [2]). Erwartungsgemäß wird bei der Anwendung der 3D Helmert-Transformation mit sieben Parametern ein Mittelwert (-0,002 m) nahe Null erreicht (Abbildung 5.26 - [3]). Die Kartierung verdeutlicht den Umstand, dass bei unzureichender Berücksichtigung der Registrierung multitemporaler Punktwolken Fehlinterpretationen möglich sind. Aufgrund der systematischen Abweichungen von Koordinatenwerten werden Alarmwerte überschritten und es kommt möglicherweise zu Fehlalarmierungen.

5.3.3.3. Zusammenfassung und Diskussion

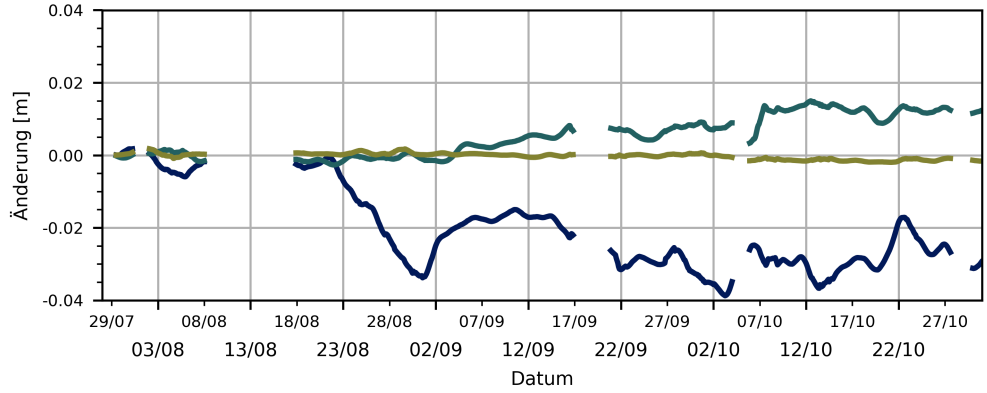
Die Zeitreihen der Koordinaten weisen eine Bewegung des Scanners nach und eine Installation auf einem Messpfeiler darf nicht als stabil angenommen werden. Dieses Kapitel zeigt anhand umfangreicher Zeitreihen, dass die Transformation einzelner Scandaten in einen gemeinsamen Koordinatenrahmen weiterhin einen elementaren Schritt im Prozess einer Deformationsanalyse darstellt. Die Herausforderung bei der Berechnung von Transformationsparametern zwischen den einzelnen Messepochen besteht darin, dass zum einen aufgrund der Messmethodik Punktkorrespondenzen herzuleiten sind und zum anderen speziell bei geomorphologischen Untersuchungen anspruchsvolle Messumgebungen zu analysieren sind. Aufgrund praktischer Anforderungen, dass zum Beispiel ein zu überwachendes Objekt nicht betreten werden darf, ist eine datenbasierte Registrierungsmethode anzustreben. Bei der Anwendung eines ICP-basierten Algorithmus



(a) X-Achse [SOCS]



(b) Y-Achse [SOCS]



(c) Z-Achse [SOCS]

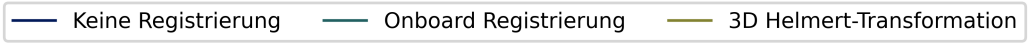


Abb. 5.25.: Der Vergleich verschiedener Registrierungsansätze multitemporaler Datensätze. Dargestellt als Zeitreihe vom 29.07.2021 bis zum 31.10.2021. Inkl. drei Datenlücken aufgrund kurzzeitiger Systemausfälle.

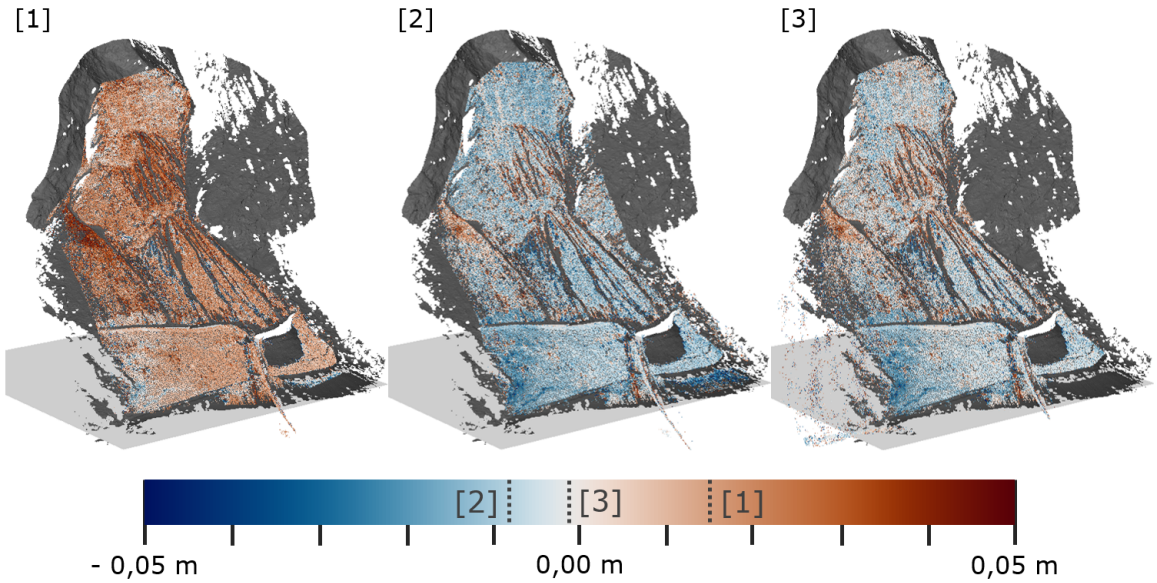


Abb. 5.26.: Der Vergleich verschiedener Registrierungsansätze als «Impact Map». [1]: Keine Registrierung, [2]: Onboard-Registrierung und [3] Helmert-Transformation.

in diesem Kapitel sind weiterhin systematische Abweichungen erkennbar, die auf eine unzureichende Registrierung der Datensätze deutet. Problematisch ist, dass keine Klassifizierung der einzelnen Punktwolken stattfindet und alle Bereiche gleichwertig berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass stabile Bereiche, die für eine Transformation unabdingbar sind, nicht von denen mit Bewegungen unterschieden werden. Bewegte Bereiche können sowohl Bereiche mit geomorphologischen Prozessen als auch Bereiche mit Vegetation sein. Mittels einer klassischen Helmert-Transformation an den ausgewählten Prismen, die in stabilen Bereichen installiert sind, wird demonstriert, dass eine sachgerechte Registrierung erreicht werden kann und die Zeitreihen nicht von systematischen Einflüssen beeinflusst sind. Obwohl die Nutzung von Prismen zielführend ist, ist diese Methode aus praktischer Sicht in Zukunft nicht zu bevorzugen. Es wird gezeigt, dass die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung datenbasierter Methoden besteht. Die Thematik ist nicht neu und wurde bereits durch Friedli und Wieser (2016), Wujanz et al. (2018a) und Y. Yang und Schwieger (2022) diskutiert. Die Autoren zeigen Lösungen, die eine Klassifizierung von stabilen Bereichen beinhaltet. Deren Adaption auf multitemporale Datensätze von PLS sowie die Anwendung in Gebieten mit einem hohen Anteil an Vegetation in Form von Sträuchern und Bäumen ist bisher noch nicht vollzogen. Künftige Entwicklungsthemen sind aus heutiger Sicht die Kombination der zuvor genannten datenbasierten Registrierungsmethoden mit Methoden, die eine Klassifizierung der Punktwolkendaten ermöglichen, und die Berücksichtigung eines adäquaten stochastischen Modells, das die Messung über längere Zeiträume berücksichtigt. Bezüglich der Klassifizierung sind die Veröffentlichungen von Mayr et al. (2017) und Kermarrec et al. (2022b) zu nennen. Kermarrec et al. (2022b) zeigen eine erfolgreiche Umsetzung am Datensatz im Valsertal, was als Grundlage für die weiteren Untersuchungen dient. Übereinstimmend mit Wujanz et al. (2018a) bleibt festzuhalten, dass systematische Abweichungen im Registrierungsprozess zu falschen Schlussfolgerungen bei der Datenanalyse führt. Daher ist für PLS ein robustes Registrierungsverfahren zu entwickeln, was wirksam bewegte Bereiche berücksichtigt.

6. Informationsextraktion aus multitemporalen Punktwolken

Aus den erfassten und zentral gemanagten PLS-Daten sind substantielle Informationen für weitere Entscheidungsprozesse und somit implizit für die unterschiedlichen Stakeholder zu extrahieren. PLS erlaubt die Aufnahme von hochfrequenten Beobachtungsserien über lange Perioden. Nach Kuschnerus et al. (2021a) ergibt sich daraus ein mehrdimensionaler Datensatz mit umfangreichen Zeitreihen. Um aus der Menge an Daten Informationen über Veränderungsprozesse extrahieren zu können, sind präzise und effiziente Methoden notwendig.

Zahlreiche Studien (Eitel et al., 2016) befassen sich mit der Identifizierung von Veränderungen aus aufeinanderfolgenden Scandaten. Etablierte Verfahren basieren klassischerweise auf einem bitemporalen Vergleich zweier Epochen (Kap. 2.5.3). Anders et al. (2020) führen an, dass diese Verfahren auf kontinuierlichen 3D-Zeitserien nur begrenzt anwendbar sind, da

- nicht zwangsläufig bekannt ist, wann und wo Änderungen stattfinden,
- Änderungsformen von einer Epoche zur nächsten nicht unbedingt erkennbar sind und
- Änderungen mit räumlicher Überschneidung vorkommen.

Um komplexe geomorphologische Prozesse erklären zu können, sind neben den Positionsveränderungen außerdem Geschwindigkeiten und Beschleunigungen relevant. In der Wissenschaft ist die Analyse multitemporaler Punktwolken erst seit kurzer Zeit Thema. So haben Anders et al. (2020) mit dem Verfahren «4D objects-by-change (4D-OBC)», Kuschnerus et al. (2021a) mittels Segmentierung von Zeitserien nach eindeutigen Verformungsmustern, Kermarrec et al. (2022a) mithilfe der Ableitung von Volumen aus LR B-Splines oder Winiwarter et al. (2021) als auch Winiwarter et al. (2022a) anhand einer auf M3C2-Distanzen adaptierten Kalman-Filterung Verfahren präsentiert, die ihr Anwendungspotential zur Analyse multitemporaler Punktwolken unter Beweis gestellt haben. Die Verfahren von Anders, Kermarrec sowie Winiwarter sind zielführend, jedoch ist die Anwendbarkeit innerhalb eines echtzeitnahen Assistenzsystems in Frage zu stellen. Die Verfahren basieren auf Berechnungen der vollumfänglichen Punktwolke, die je nach Verfahren zwar räumlich reduziert oder vorgefiltert wird, aber dennoch für eine hohe Latenz zwischen Datenerfassung und der Informationsbereitstellung sorgen. Darüber hinaus kann eine Interpretation der Ergebnisse sich bei räumlicher als auch zeitlicher Überdimensionierung als herausfordernd darstellen.

Zum Zweck der Implementierung dieser Verfahren innerhalb eines Echtzeitassistenzsystems stehen nach Kuschnerus et al. (2021a) aktuell keine automatisierten Verfahren zur Verfügung. Deshalb wird in den nachfolgenden Unterkapiteln ein konzeptioneller

Entwurf eines zweistufigen Workflows vorgestellt, der diesen Verfahren eine rasterbasierte Segmentierung der räumlich verteilten Zeitreihen vorschaltet, potentiell relevante Bereiche automatisiert selektiert und dem Anwender darstellt. Mit Hilfe dieser Information lassen sich rechenintensive Verfahren in einem weiteren Schritt auf räumlich begrenzte Bereiche optimiert anwenden.

Die Segmentierung der Zeitserien wird auf Basis zweier Methoden des unüberwachten maschinellen Lernens untersucht. Zum einen werden Zeitserien mittels k-Means segmentiert (Kuschnerus et al., 2021a) und zum anderen wird die Anwendbarkeit eines Gaußschen Mischmodells (GMM) auf Basis der aus den Zeitreihen extrahierten Merkmale präsentiert. Die selektierten Bereiche werden in einem zweiten Schritt jeweils den Verfahren «4D objects-by-change» und «M3C2-EP mit adaptierter Kalman-Filterung» zugeführt. Ziel des Entwurfs ist es, ein Konzept vorzustellen, das innerhalb eines webbasierten echtzeitfähigen Assistenzsystems implementiert werden kann.

6.1. Stufe I: Segmentierung räumlich verteilter Zeitreihen auf Basis von 2D-Bildrastern als Methode des unüberwachten maschinellen Lernens

Kuschnerus et al. (2021a) haben eine Clusteringmethode vorgestellt, mit deren Hilfe räumlich verteilte Zeitreihen nach ihrer Ähnlichkeit im Änderungsverhalten gruppiert werden, um dann die zugrundeliegenden Prozesse zu identifizieren. Clustering ist als häufigste Anwendungsform des unüberwachten (maschinellen) Lernens anzusehen und zeichnet sich dadurch aus, dass es ohne ein Vorwissen von bekannten Ausgabedaten zur Detektion von Mustern in den Eingabedaten genutzt werden kann (Matzka, 2021).

In der Fallstudie von Kuschnerus et al. (2021a) wurden 30 tägliche Scans eines Sandstrands im Januar 2017 aus Kijkduin / Niederlande ausgewählt (Vos et al., 2017), an dem unterschiedliche natürliche als auch anthropogene Prozesse stattfanden. Die Zeitreihen wurden aus den Messdaten extrahiert, indem die Scans in ein gleichmäßiges Raster (1 m x 1 m) umgewandelt und für jede Zelle der Median der Höhen aus allen sich in einer Zelle befindlichen Punkten berechnet wurde. Um eine Segmentierung nach den Änderungswerten anstatt nach den absoluten Höhen durchzuführen, wird die mittlere Höhe einer Zeitreihe von jedem einzelnen Wert subtrahiert. Mittels der vorliegenden Zeitserien werden drei Clustermethoden verglichen. Es wird gezeigt, dass k-Means und agglomeratives Clustering gut funktionieren und den Testdatensatz automatisiert in plausible Segmente mit ähnlichen Prozessen gruppieren. DBSCAN liefert keine zufriedenstellenden Resultate, zeigt allerdings ein Potential zur Detektion von Ausreißern in den Zeitserien auf.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchung wird in dieser Arbeit der k-Means-Algorithmus auf den Datensatz aus dem Valsertal (Kap. 5.3.1) adaptiert und angewendet. Neben dem Potential sind auch Nachteile und Herausforderungen erwähnenswert, die es bei der hier vorgestellten Implementierung zu berücksichtigen gilt. Die Zeitserien müssen eine identische Länge als auch gleiche Zeitintervalle zwischen den jeweiligen Werten aufweisen. Im Einzelnen dürfen daher keine Datenlücken vorhanden sein. Datenlücken und differierende Intervalle, die den kompletten Datensatz

gleichermaßen betreffen, sind nicht von Nachteil. Ausreißer in den Zeitreihen beeinflussen jedoch das Ergebnis. Dies äußert sich entweder durch fehlerhafte Clusterzentren bei einer niedrigen Anzahl von Segmenten oder kann zu relativ kleinen separaten Gruppierungen führen, wenn eine große Anzahl an Segmenten ausgewählt ist (Kuschnerus et al., 2021a). Lindenbergh et al. (2019) führen außerdem an, dass der Anwender die Anzahl k der benötigten Cluster im Vorhinein angeben muss. Ohne Kenntnisse zum vorliegenden Datensatz kann dies herausfordernd sein. Bei der Auswahl einer sinnvollen Anzahl an Clustern ist die zugrundeliegende Methode im Auge zu behalten. So wird bspw. eine Erosion, die räumlich an zwei unterschiedlichen Stellen und zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten stattfindet, nicht einem Cluster zugeordnet. Die Zeitreihen sind im Sinne einer Minimierung nicht ähnlich. Dem gegenüber können räumlich als auch zeitlich dominante Prozesse andere Ereignisse überlagern und werden somit nicht mittels einer k-Means-Zeitseriensegmentierung detektiert. Mit zunehmender Anzahl an k Clustern können diese Unterschiede eindeutigen Clustern zugeordnet werden und detaillierte Prozesse kommen zum Vorschein. Jedoch ist der Informationsgehalt in den jeweiligen Segmenten bei komplexen Messszenen in Frage zu stellen und die Gefahr einer Überanpassung (Overfitting) des Modells besteht.

Alternativ zur Segmentierung vollumfänglicher Zeitreihen in Gruppen lassen sich Features aus den Zeitreihen extrahieren. Nach Winiwarter et al. (2022a) bietet das den Vorteil, dass die Dimensionalität reduziert werden kann und unabhängig von der Länge und Dichte der Zeitserie ist. Zum anderen können Merkmale nach ihrer Definition gruppiert werden, unabhängig davon, wann etwas passiert. Diese Merkmale ermöglichen eine stärker physikalisch geprägte Interpretation der Prozesse (Winiwarter et al., 2022a). Daher wird alternativ zum Clustering von Zeitserien mittels k-Means ein Verfahren vorgestellt, das featurebasiert funktioniert. Ziel der Gegenüberstellung beider Verfahren ist es, die Anwendung an dem Datensatz aus dem Valsertal nachzuweisen und ein Konzept zur Implementierung innerhalb eines Echtzeitassistenzsystems zu diskutieren. Ziel ist nicht, die Verfahren an sich anhand von Kennzahlen vergleichend zu bewerten. Die jeweiligen Methoden werden visuell und subjektiv begutachtet. Final wird überprüft, ob sich die Cluster eindeutigen geomorphologischen Prozessen zuordnen lassen. Deshalb liegen diesem Kapitel vier Arbeitsschritte zugrunde:

1. Extraktion der Zeitreihen aus den Punktwolken,
2. Ableitung von Features aus den Zeitreihen,
3. Clustering der Features,
4. Identifizierung von geomorphologischen Prozessen.

Zur Erarbeitung des Konzeptes und zur Evaluierung der Verfahren wurde aus dem Datensatz im Valsertal (Kap. 5.3.1) ein zeitlicher Ausschnitt vom 02.08.2021 bis zum 22.09.2021 selektiert. Es werden die Scandaten in voller zeitlicher Auflösung, d.h. alle drei Stunden, genutzt. Innerhalb dieses Zeitraums ist es zu drei Erosionsrinnen als natürlichem Prozess und zu einer Baustellenaktivität als anthropogenem Ereignis an der Querrinne (Abb. 5.11) gekommen. In zwei Zeiträumen (08. bis 17.08.2021 und 17. bis 20.09.2021) kam es zu einem Ausfall des Systems und es liegen keine Daten vor. Abbildung 6.1 zeigt einen bitemporalen Vergleich des Zeitraums. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden erst Veränderungen ab 10 cm bis 50 cm dargestellt. Werte

darunter sind grün, darüber rot dargestellt. Mittels dieser Abbildung ist bekannt, dass diese Ereignisse in den Daten vorhanden sind, und kann mir zum jetzigen Zeitpunkt alle dazwischenliegenden Szenen anschauen und die Prozesse zeitlich verorten.

- **Erosionsereignis durch Gewitter:**
  07.08.2021 21:00 Uhr bis 08.08.2021 09:00 Uhr
- **Anthropogene Aktivität mittels Baggerarbeiten an der Querrinne:**
  20.09.2021 06:00 Uhr bis 22.09.2021 15:00 Uhr

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Zeitraum des Erosionsereignisses grün und der des anthropogenen Ereignisses blau dargestellt. Bei der manuellen Betrachtung der einzelnen Scans über die Zeit fällt zusätzlich auf, dass an unterschiedlichen Stellen im Scan Wiesen wachsen und zu verschiedenen Zeitpunkten gemäht werden. Diese Prozesse sind als geometrische Veränderungen in den Scandaten zu erkennen. Aufgrund dieser Vorkenntnis, die nicht in die Clusterverfahren einfließt, kann diese Information als «Ground-Truth» angesehen und für diese Evaluierung genutzt werden.

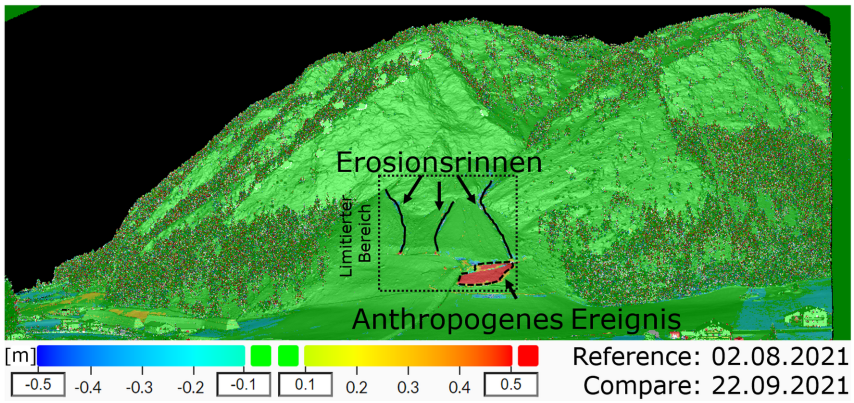


Abb. 6.1.: Bitemporaler Vergleich der Szene zwischen dem 02.08.2021 und dem 22.09.2021 mit Darstellung von drei Erosionsrinnen und einem anthropogenen Event. Limitierter Bereich entsprechend Kapitel 6.1.2.2.

6.1.1. Extraktion von Zeitreihen aus den Punktwolken

Zeitreihen basieren auf identen Punkten, die in jeder Epoche eindeutig zugeordnet werden können. Es haben sich verschiedene Methoden etabliert, um Punktkorrespondenzen aus TLS-Punktwolken zu erzielen (Kap. 2.5.3). Im 3D-Raum lassen sich bspw. M3C2-Distanzen (Lague et al., 2013) oder Distanzen mit Hilfe des M3C2-EP (Winiwarter et al., 2021) als Identitäten in sich wiederholenden Epochen nutzen. Ziel der hier vorgestellten Methodik ist der zeitoptimierte Einsatz innerhalb von Überwachungsaufgaben, sodass rasterbasierte Repräsentationen in Form eines Bildes von Vorteil sind. Bilder, abgeleitet aus Punktwolken, stellen große Mengen an Informationen komprimiert und effizient dar (Vosselman & Maas, 2010). Die Autoren führen weiter an, dass sich diese Darstellungsoption besonders dann eignet, wenn die Datenerfassung entweder mittels Airborne Laserscanning (ALS) oder TLS aus einer einzigen Position heraus erfolgt ist. Solche Datensätze können für den jeweiligen Scan als Höhen- oder Entfernungsbild in eine 2,5D-Darstellung umgewandelt werden (Vosselman & Maas, 2010). Höhen

oder Strecken können dann als Graustufe oder Farbwert gespeichert werden, sodass ein komprimiertes Datenformat gegenüber der vollaufgelösten 3D-Punktwolke vorliegt.

Kuschnerus et al. (2021a), Lindenbergh et al. (2019) und Müller et al. (2016) führen ähnliche Transformationen der Daten durch. Solche Methoden sind herstellerunabhängig und sind in den gängigen Tools zur Punktwolkenkonvertierung wie bspw. LAStools (rapidlasso, 2022), CloudCompare (2022), GDAL (GDAL/OGR contributors, 2022) oder OPALS (Pfeifer et al., 2014) enthalten. Als Datengrundlage für die weiteren Bearbeitungsschritte wird ein Rasterdatenformat gewählt, das direkt am Laserscanner (hier: RIEGL VZ-2000i) innerhalb der Monitoringapplikation von RIEGL generiert wird (Gaisecker & Schröder, 2022). Bei der Konvertierung der Punktwolke hin zum Rasterdatenformat werden bei jeder Messung die Daten im Polarkoordinatensystem des Scanners (SOCS) in eine 2D-Darstellung als Tiefenbild transformiert. Dabei werden in einem Pixel 25 Punkte (fünf Winkelschritte horizontal und vertikal) zusammengefasst (Abb. 6.2).

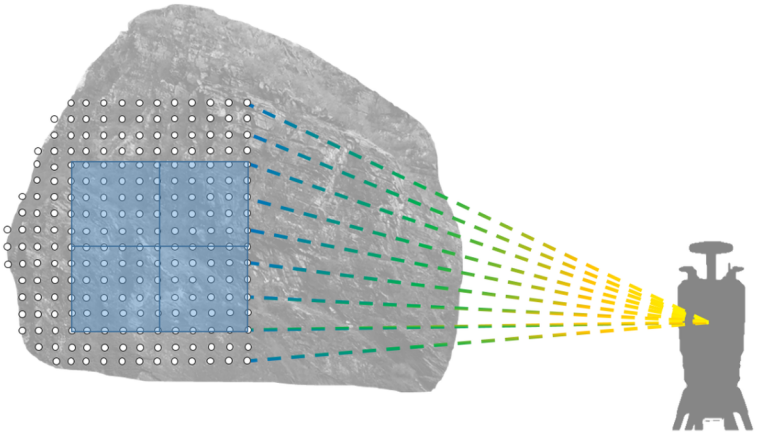


Abb. 6.2.: Transformation der 3D-Punktdaten in eine rasterbasierte Repräsentation.

Alle Punkte innerhalb einer Rasterzelle werden mittels Ebenenausgleichung statistisch ausgewertet, um Informationen zur Reichweite und Orientierung einer jeden Rasterzelle zu erhalten. In dem hier vorliegenden Fall werden die Entfernungs- und Oberflächenorientierungsinformationen eines Objektes am Laserscanner selbst mittels RGBA (Rot-Grün-Blau-Alpha) codiert und für jede Messepoche als PNG-Bilddatei gespeichert (Schritt 1, Abb. 6.5). Aufgrund dieses Datenformats liegt der Speicherbedarf pro Epoche nur noch bei etwa 10 % der Rohdaten. Der reduzierte Speicherbedarf unterstützt die Echtzeitfähigkeit, und Rasterdatenformate sind einfach zu verarbeitende Datenformate bei der Anwendung gängiger Softwarebibliotheken. Die RGBA-Codierung ermöglicht theoretisch Entfernungswerte mit Millimeterauflösung über eine Strecke von mehr als 16 km. Die Raumlage wird durch ein Skalarprodukt berücksichtigt, welches im Alphakanal A pro Pixel gespeichert ist. Das Skalarprodukt beschreibt den Winkel zwischen dem Normalenvektor an der Oberfläche der Ebene und den direkten Verbindungsvektor von Scanner zum Pixel. Wenn der lokale Normalenvektor der Strahlrichtung entspricht, ist das Skalarprodukt 1, was zu einem Wert von Alpha = 255 führt. Je mehr eine Rasterfläche gegenüber der Laserstrahlrichtung geneigt ist, desto niedriger ist der Alphawert. In Abbildung 6.3 wird die resultierende Datei dargestellt. Beispielhaft werden die Werte eines Pixels ausgewählt. Mittels Gleichung 6.1 kann die Information aus den RGBA-Werten für jeden Pixel decodiert und eine Strecke in Metern, vom Scan-

nerursprung ausgehend, berechnet werden (Schritt 2, Abb. 6.5). Das Ergebnis ist eine weitere Rasterdatei im PNG-Format, welche die absoluten Strecken beinhaltet (Schritt 3, Abb. 6.5). Mittels der im Beispiel ausgewählten Werte (Abb. 6.3) und der Gleichung 6.1 ergibt sich eine Strecke von 586,612 m.

$$r_{pix(i,j),t_n} = 0.001(R + 256G + 256^2 B) \tag{6.1}$$

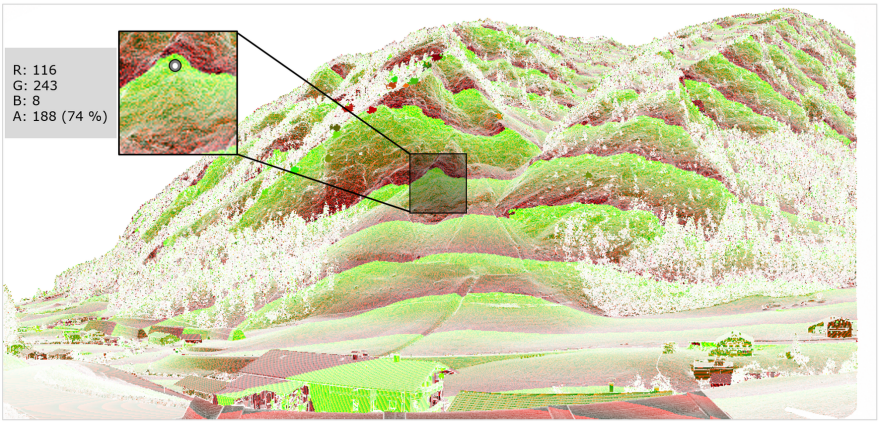


Abb. 6.3.: RGBA-codiertes Rasterbild mit beispielhaften RGBA-Werten für ausgewähltes Pixel.

Als Feature für die Segmentierung wird die Veränderung der Strecke über die Zeit in Bezug auf die erste Messung berechnet. Analog zu Lindenbergh et al. (2019) wird damit erreicht, dass die Änderungen und nicht absolute Strecken als Merkmal für die Segmentierung genutzt werden. In Gleichung 6.2 ist die Formel zur Berechnung der Streckendifferenzen beschrieben (Schritt 4, Abb. 6.5). Die Differenz bezieht sich näherungsweise entlang eines mittleren lokalen Normalenvektors zwischen der Referenz- und der zu vergleichenden Epoche. Positive Werte entsprechen einer Veränderung oberhalb und negative Werte einer Veränderung unterhalb der Referenzfläche (Abb. 6.4).

$$\begin{gathered}\Delta r_n = 0.5(r_{pix(i,j),t_0} - r_{pix(i,j),t_n})(s_{pix(i,j),t_0} + s_{pix(i,j),t_n}); \\ mit\ s = \mathbf{b} * \mathbf{v} = A/255\end{gathered} \tag{6.2}$$

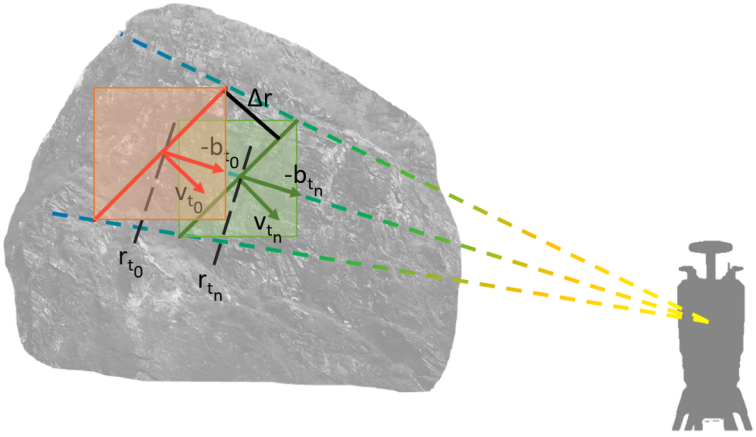


Abb. 6.4.: Darstellung des formellen Zusammenhangs bei der Bildung von Streckendifferenzen zwischen zwei Messungen.

Die Streckendifferenz wird für jede Epoche mit Bezug zur Nullepoche (02.08.2021 15:00 Uhr) für jeden Pixel gespeichert (Schritt 5, Abb. 6.5). Jede Zeitserie besteht aus 318 Datenpunkten. Aufgrund der Erfahrungen von Kuschnerus et al. (2021a) werden die Daten im nächsten Schritt einer globalen Filterung (Schritt 6, Abb. 6.5) unterzogen. Der Filter beinhaltet zunächst die Detektion des Himmels. Der Himmel kann mittels Anwendung der Formulierung 6.3 in den jeweiligen Zeitreihen selektiert und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden.

$$\sum_{i=0}^{n} \Delta r_i = 0 \tag{6.3}$$

In dem Datensatz kommt es des Weiteren zu Datenlücken in einzelnen Zeitserien bspw. durch Wolken oder Gewitter. Die Lücken werden zunächst als nan markiert. In einem weiteren Schritt werden die Zeitreihen auf grobe Ausreißer untersucht. Ausreißer werden für diese Untersuchung mittels eines Schwellwertes $> 1{,}0$ m und $< -1{,}0$ m ebenfalls als nan markiert. k-Means ist nicht resistent gegen einzelne Datenlücken. Daher werden Lücken durch Berücksichtigung des letzten gültigen Wertes gefüllt. Andere Techniken zur Interpolation der Messdaten sind denkbar, werden innerhalb dieser Arbeit aber nicht untersucht. Um eine möglichst zuverlässige Lösung der Segmentierung zu erhalten, werden zusätzlich nur die Zeitserien genutzt, bei denen in mindestens 75 % des ausgewählten Zeitraums Daten vorhanden sind. Die vorliegenden und vorbereiteten Zeitserien können jetzt jeweils den Segmentierungsalgorithmen zugeführt werden (Schritt 7, Abb. 6.5). Datenlücken, die das ganze Modell betreffen, stellen für die vorgestellten Segmentierungsmethoden kein Problem dar.

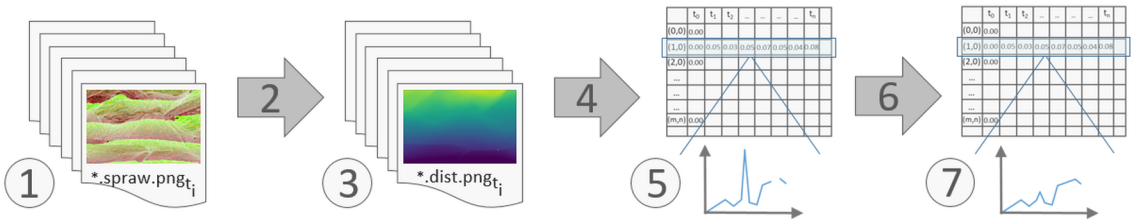


Abb. 6.5.: Workflow zur Extraktion von Zeitreihen aus 3D-Punktwolken.

6.1.2. Zeitreihensegmentierung mittels k-Means-Algorithmen

6.1.2.1. Methode

Der k-Means-Algorithmus wurde erstmals 1955 vorgestellt und ist immer noch eine der am häufigsten verwendeten Clustermethoden (Bishop, 2006; Jain, 2010). Der Algorithmus basiert auf der Minimierung der Summe der Distanzen zwischen den Datenpunkten und den jeweiligen Schwerpunkten unter Bezugnahme aller möglichen Clusterzentren V (Gl. 6.4). Matzka (2021) führt aus, dass für die Zuordnung der Daten zu einzelnen Gruppen deren Ähnlichkeit beziehungsweise Unterschiedlichkeit zu anderen Datenpunkten genutzt wird. Als minimierende Metrik wird die euklidische Distanz zugrunde gelegt. Nach Winiwarter et al. (2022a) wird dadurch das Erfordernis formuliert, dass alle Dimensionen innerhalb dieses Modells die gleiche Einheit und Skalierung nutzen müssen. Alternative Abstandsmaße werden bei Keogh und Kasetty (2003) diskutiert, führen jedoch aus, dass insbesondere bei Zeitreihen mit hohen Dimensionen Alternativen selten

besser abschneiden als die Euklidische Distanz. Aus diesem Grund wird im Zuge dieser Arbeit kein alternatives Maß in die Untersuchungen mit einbezogen.

$$\mathrm{Min}_V \, J(V) = \sum_{j=1}^{k} \sum_{x_i \in v_j} \|x_i - v_j\|^2 ; \text{ mit } \|\cdot\| \text{ als Euklidische Distanz} \tag{6.4}$$

Die Umsetzung der Methode wird mittels der Programmiersprache Python vollzogen. Für das Clustering der Zeitserien wird auf das Programmpaket tslearn (Tavenard et al., 2020) zurückgegriffen. Die Eingabeparameter sind einfach gehalten. Neben der (i) Metrik für die Distanzen ist das Ende der Berechnung durch eine (ii) maximale Anzahl an Iterationen abzusichern. Mit jeder Iteration nähern sich die jeweiligen Zeitreihen den Clusterzentren an, bis die quadrierte Summe der Distanzen (Gl. 6.4) über alle Segmente minimal ist bzw. die Ergebnisse konvergieren. Die maximale Anzahl wurde auf 1.000 festgelegt, die bei keiner der Berechnungen erreicht wurde. Der letzte Parameter beinhaltet die Angabe einer (iii) Anzahl an Clustern k, die mittels k-Means berechnet werden sollen. Die Festlegung ohne Vorwissen wurde bereits als Nachteil beschrieben. Daher wird das Clustering für eine verschiedene Anzahl an k Clustern durchgeführt (Schritt 8, Abb. 6.6). Das Ergebnis des Clusterings muss bewertet werden. Es können an dieser Stelle zwei Verfahren vorgestellt werden, die sich dazu eignen, als Deskriptoren für die Ermittlung einer bestmöglichen Anzahl der zu nutzenden Segmente eingesetzt zu werden (Schritt 9, Abb. 6.6).

1. *Ellenbogen-Methode (Elbow Method)*: Diese Methode liefert Hinweise darüber, wie viele Cluster das vorliegende Modell beschreiben. Es ist jedoch als heuristisches Verfahren zu betrachten. Bei uneindeutigen Ergebnissen, muss der Anwender durch seinen Erfahrungsschatz eine sinnvolle Interpretation durchführen. Aus diesem Grund kann diese Methode lediglich als Hilfsmittel betrachtet werden und gibt keine zuverlässige Angabe. Bei dem Verfahren wird das Modell für eine verschiedene Anzahl k durchgeführt, und die resultierenden Summen der Abweichungsquadrate (Gl. 6.4) werden in Abhängigkeit von k in einem X-Y-Plot eingetragen. Visuell wird beurteilt, dass ein optimales k dann vorhanden ist, wenn sich die Änderungsrate signifikant ändert und konstant bleibt (Shi & Zeng, 2013). Die alleinige Beurteilung von minimalen Abweichungsquadraten ist aufgrund der Abhängigkeit von k nicht zielführend und kann zu Fehlinterpretationen führen. Daher wird eine ergänzende Beurteilungsmethode vorgeschlagen.

2. *Silhouettenkoeffizient*: Der Koeffizient kombiniert sowohl Kohäsion innerhalb eines Clusters als auch die Separation von Clustern (Tan et al., 2006) und eignet sich daher für die Qualitätsbeurteilung einer Segmentierung mit k Clustern (Shi & Zeng, 2013). Die Berechnung des Koeffizienten besteht nach Kaufman und Rousseeuw (1990) aus vier Berechnungsschritten:

   (a) Für jeden Datenpunkt i wird die durchschnittliche Distanz zu allen anderen Objekten innerhalb eines Clusters berechnet. a steht in Gleichung 6.5 für die Kohäsion.

   (b) Für jeden Datenpunkt i wird die durchschnittliche Distanz zu allen anderen Objekten des nächstgelegenen Clusters bestimmt. b ist in Gleichung 6.5 ein Maß für die Separation.

(c) Berechnung des Silhouettenkoeffizienten für jeden Datenpunkt i:

$$s_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)} \tag{6.5}$$

(d) Berechnung des durchschnittlichen Koeffizienten $\bar{s}_i$ (6.6) für jedes einzelne Cluster und s_k (6.7) über alle Cluster.

$$\bar{s}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} s_i \tag{6.6}$$

$$s_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \bar{s}_i \tag{6.7}$$

Der Wert des Koeffizienten kann zwischen -1 und 1 variieren. Negative Werte sind unerwünscht, da dies dem Fall entsprechen würde, dass der mittlere Abstand zum benachbarten Cluster größer ist als zu den Objekten im eigenen Cluster. Es wäre keine Separation gegeben. Es werden positive Werte nahe 1 angestrebt, sodass a nahe 0 ist (Tan et al., 2006). Kaufman und Rousseeuw (1990) bewerten die Koeffizienten in Tabelle 6.1 subjektiv.

Tab. 6.1.: Subjektive Interpretation des Silhouettenkoeffizienten nach Kaufman und Rousseeuw (1990, S. 88).

s_k	**Empfohlene Interpretation**
0,71 - 1,00	Es wurde eine starke Struktur nachgewiesen.
0,51 - 0,70	Es wurde eine brauchbare Struktur nachgewiesen.
0,26 - 0,50	Die Struktur ist schwach und könnte falsch sein.
$\leq$ 0,25	Es wurde keine substantielle Struktur gefunden.

Nach der Interpretation der Ergebnisse und der Wahl k geeigneter Cluster wird die Segmentierung durchgeführt. Es ist hervorzuheben, dass Zeitreihen segmentiert werden und der räumliche Kontext bei dieser Methode außer Acht bleibt. Die Zeitreihen sind zwar räumlich indiziert, haben aber keine Kenntnis über nachbarschaftliche Beziehungen untereinander. Als Ergebnis erhält jede Rasterzelle eine Zuweisung zu einem Segment. Eingefärbt nach den Clustern und über den räumlichen Index kann erneut eine PNG-Datei erzeugt und mit deren Hilfe die räumlichen Zusammenhänge interpretiert werden (Schritt 10, Abb. 6.6).

Für die Definition der verknüpften Prozesse werden alle Zeitreihen eines Segmentes gemittelt. Dieser Mittelwert wird zusammen mit allen anderen Mittelwerten der jeweiligen Cluster gegenüberstellend grafisch dargestellt (Schritt 11, Abb. 6.6). Alternativ lässt sich der Median nutzen, der gegenüber Ausreißern in den jeweiligen Segmenten robust ist. Die grafischen Darstellungen im Raum als auch in der Zeitserie basieren farblich auf den «Scientific colour maps» von Crameri (2021). Bei den Zeitserien in den Resultaten (Kap. 6.1.2.2) wird in grün das Erosionsereignis durch Gewitter, in blau die anthropogene Aktivität sowie in beige der Datenausfall dargestellt.

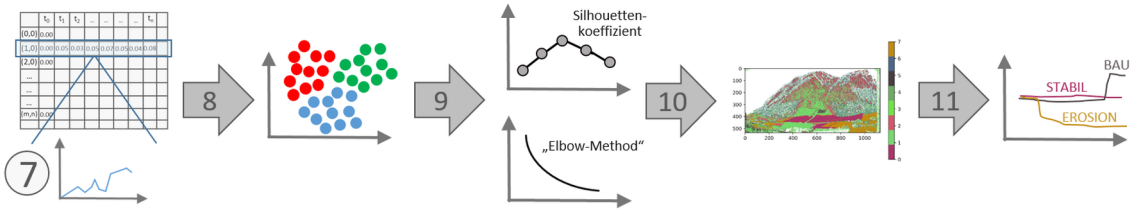
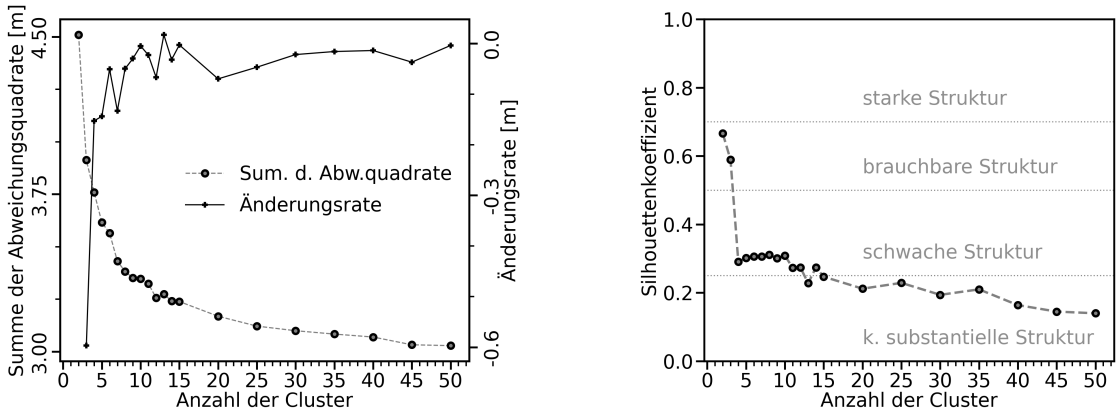


Abb. 6.6.: Workflow zur Zeitreihensegmentierung mittels k-Means-Clustering.

6.1.2.2. Resultate

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden einige Ergebnisdarstellungen dieses Kapitels im Anhang B dargestellt. Zunächst werden Modelle für verschiedene k's (2 bis 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 und 50) berechnet. Nach Extraktion der Zeitreihen aus der Punktwolke und der entsprechenden Filterung nutzt der k-Means Algorithmus 406.755 Zeitreihen für die Segmentierung. Aus den jeweiligen Berechnungen werden die Summen der Abweichungsquadrate (Abb. 6.7a und Tab. B.1) sowie die Silhouettenkoeffizienten (Abb. 6.7b und Tab. B.1) abgeleitet und interpretiert. In den beiden Abbildungen 6.7a und 6.7b ist keine eindeutige Struktur zu erkennen. Die Ergebnisse können mehrdeutig interpretiert werden. Abbildung 6.7a lässt zwar einen Ellenbogen vermuten, zeigt jedoch nicht eindeutig für ein bestimmtes k eine Veränderung in der Änderungsrate. Der Silhouettenkoeffizient (Abb. 6.7b) zeigt ebenfalls keine klar definierten Minima und Maxima. Im Sinne einer semiautomatischen Echtzeitassistenz der hier vorliegenden Methodik ist im nächsten Schritt eine manuelle Analyse der Daten notwendig.



(a) Summen der Abweichungsquadrate.

(b) Silhouettenkoeffizienten.

Abb. 6.7.: Kombinierte Betrachtung der beiden Auswahlkriterien - Summen der Abweichungsquadrate und Silhouettenkoeffizient.

Der Koeffizient in Abb. 6.7b zeigt für k=2 und 3 maximale Ergebnisse, die nach Kaufman und Rousseeuw (1990, S. 88) auf eine «brauchbare Struktur» hindeuten. Die Summen der Abweichungsquadrate widersprechen dem jedoch. Bei Betrachtung der Abb. 6.7a ist ersichtlich, dass das Minimum bei der Summe der Änderungsquadrate noch nicht erreicht ist. Unter Bezugnahme des Silhouettenkoeffizienten als zusätzlicher Informationsquelle (Abb. 6.7b) wird im Folgenden ein Modell mit k=8 untersucht. Der Silhouettenkoeffizient für k=8 sticht als Maximum aus der einer Reihe von Koeffizienten (k=4 bis 14) hervor, die nach Tab. B.1 als Modell mit «schwacher Datenstruktur»

interpretiert werden können. Die Auswahl wird legitimiert, da in Abb. 6.7a auch eine Veränderung in der Änderungsrate bei den Summen der Änderungsquadrate ersichtlich ist. Zunächst werden die segmentierten Zeitreihen in ein räumliches Bild transformiert (Abb. 6.8). Wichtig ist, dass die räumliche Lage der Rasterzellen zueinander in der Segmentierung nicht berücksichtigt ist und ein Clustering einzig auf der Streckenveränderung entlang eines näherungsweise mittleren Normalenvektors über die Zeit beruht. Visuell ist eine Struktur erkennbar, und mit Hilfe der unterschiedlichen Segmente entsteht ein kontrastreiches Bild, aus dem die Erosionsrinnen, Vegetation (Bäume) und Vegetation (Wiesen) erkennbar sind. Die Baustellenaktivität ist nicht als eigenes Segment zu sehen.

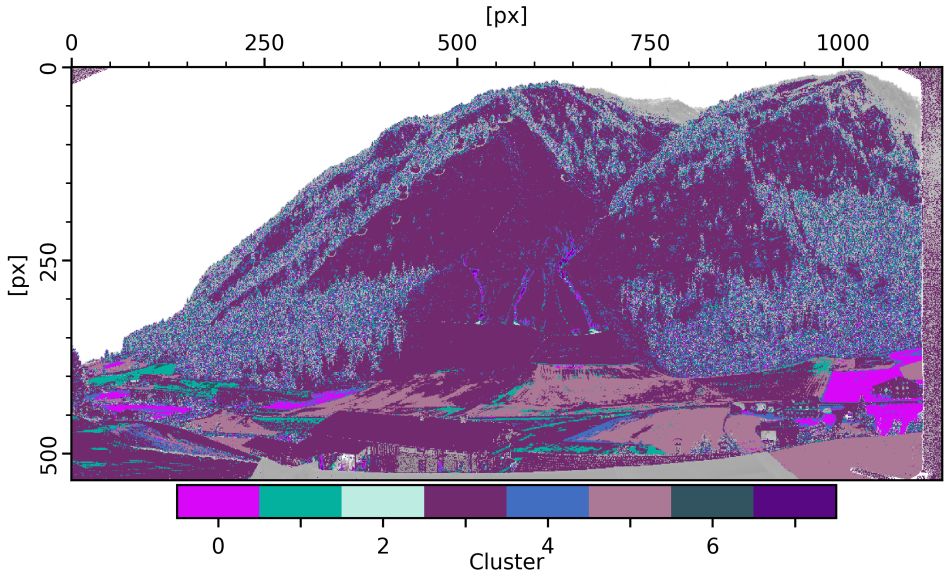
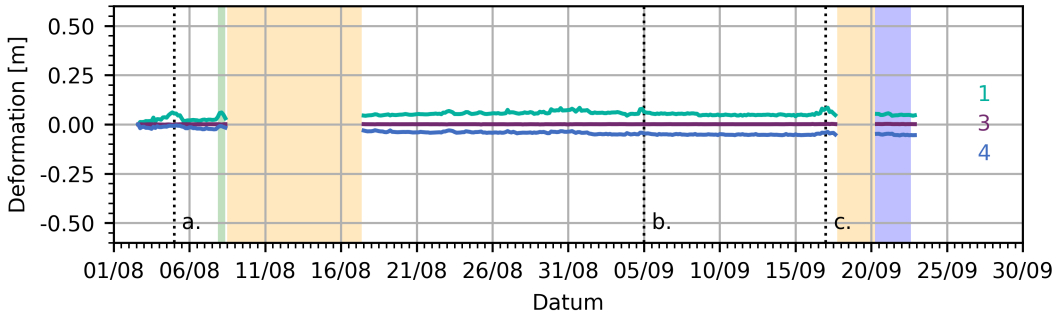


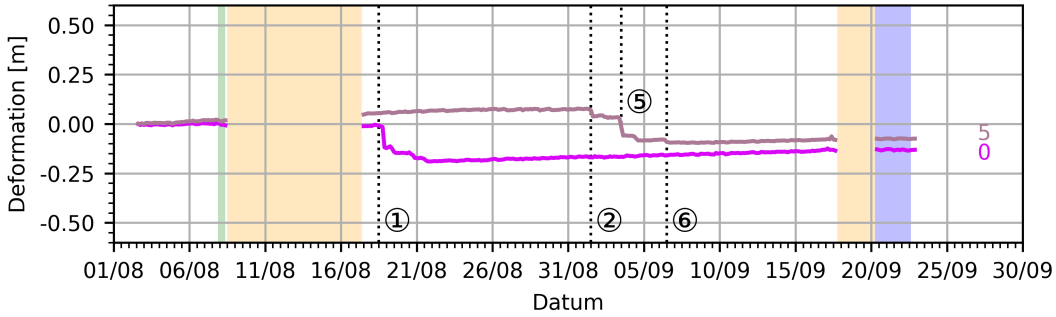
Abb. 6.8.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis (k=8).

Tab. 6.2.: Zusammenfassung der Ergebnisse für k=8 und aggregierte subjektive Klassifizierung.

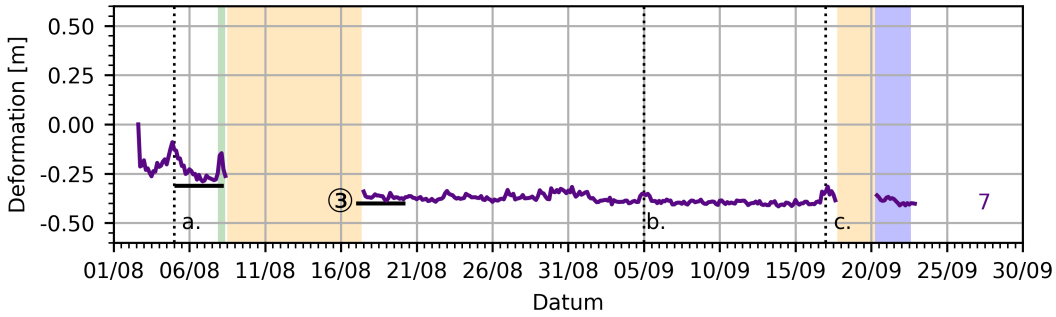
Klasse	Segment	Anz. Rasterzellen	[%]	SD [m]
A. (Stabil)	3	261.457	82,1	0,049
	4	38.156		0,134
	1	34.209		0,140
B. (Gras + Mäharbeiten)	5	37.660	14	0,070
	0	19.224		0,179
C. (Erosion)	7	3.861	0,9	0,294
D. (Akkumulation)	6	9.047	3,0	0,245
	2	3.141		0,299
		406.755	100,0	



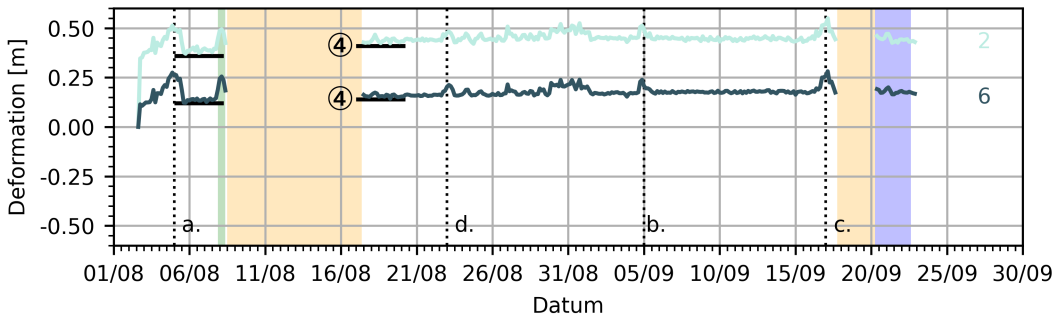
(a) Klasse A: Stabile Bereiche oder Bereiche mit homogen, linearen Veränderungen.



(b) Klasse B: Wachsendes Gras und dazugehörige Mäharbeiten.



(c) Klasse C: Erosion von Felsmaterial.



(d) Klasse D: Akkumulation von Felsmaterial.

Abb. 6.9.: Median der Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung (k=8).

In Abbildung 6.9 wird für jedes Segment der Median aus allen Zeitreihen eines Clusters dargestellt - der Mittelwert liefert aufgrund seiner Anfälligkeit gegenüber Ausreißern keine sinnvollen Ergebnisse. Der Median der Zeitreihen für die acht Segmente lässt sich subjektiv durch den Anwender interpretieren. Alle Zeitreihen lassen sich plausibel klassifizieren, zwar nicht exklusiv, aber in einer Gruppe von Prozessen. Der Klasse A. (stabile bzw. homogen, lineare Prozesse), Klasse B. (Wachsendes Gras und dazugehörige Mäharbeiten), Klasse C. (Erosion von Felsmaterial) und Klasse D. (Akkumulation von Felsmaterial) werden die einzelnen Segmente zugeordnet (Tab. 6.2). Klasse A. werden manuell drei Segmente zugewiesen. Anhand der Abb. 6.9a und der Standardabweichungen in Abb. B.5 und Tab. 6.2 ist zu sehen, dass Segment 1 und 4 einen erhöhten Wert vorweisen, der für eine erhöhte Variation in den Zeitreihen des Segmentes spricht und somit auf nicht segmentierte Subprozesse deutet. Zudem sind in Abb. 6.9a Maxima im grünen Bereich als auch bei den Zeitpunkten a., b. und c. sichtbar, was auf Einflüsse auf das Segment aufgrund schlechten Wetters spricht. Der Klasse B. sind zwei Segmente zugewiesen, denen jeweils Wiesen mit den entsprechenden Mäharbeiten zugeordnet werden können. Die Mäharbeiten zu den Zeitpunkten ①, ②, ⑤ und ⑥ sind räumlich ebenfalls trennbar (Abb. B.2 und 6.9b). Den Klassen C. und D. können jeweils Erosion und Akkumulation zugewiesen werden. Eine Veränderung des Niveaus bei ③ und ④ in den Zeitreihen (Abb. 6.9c und 6.9d) um den Zeitraum des Gewitters in Verbindung mit der visuellen Betrachtung (Abb. B.3 und B.4) der Segmente lassen diese Klassifizierung zu. Die erhöhte Standardabweichung (Abb. B.5 und Tab. 6.2), keine eindeutige Struktur in den Zeitreihen (Abb. 6.9c und 6.9d) sowie die Zuweisung von Pixeln im Bereich der Bäume (Abb. B.3 und B.4) deuten auf eine hohe Varianz in den Segmenten. Das Signal der gesuchten Subprozesse ist mittels der hier beschriebenen Methode nicht von ähnlichen Prozessen extrahierbar, die auch an anderen Stellen im Bild auftreten. Die Komplexität und Redundanz im Datensatz führen dazu, dass die gesuchten Signale nicht hervortreten.

Es wird versucht durch eine weitere Unterteilung mit Hilfe von mehr Segmenten die Prozesse eindeutig zu identifizieren. In dieser Arbeit fällt die Wahl auf zwei weitere Modelle: k=14 und k=50. Während die Wahl für k=14 dadurch begründet ist, dass dies der letzte Wert ist, bevor die Resultate des Silhouettenkoeffizienten (Abb. 6.7b) als «nicht substantiell» bewertet werden, wird k=50 intuitiv als Extrembeispiel gewählt, um der Algorithmik den Freiheitsgrad zu gewähren, eine Vielzahl von Prozessen separat segmentieren zu können. Die räumlichen Darstellungen (Abb. 6.10 und 6.11) zeigen die weitere Untergliederung der Szene in die unterschiedlichen Segmente. Die Bilder wirken weiterhin strukturiert und kontrastreich. Im Wesentlichen fällt auf, dass visuell die Baustelle in beiden Modellen zu erkennen ist. Die Tabellen 6.3 und 6.4 zeigen außerdem, dass zwei weitere Klassen für die Segmentierung in Frage kommen: Klasse E. (Vegetation in Form von Bäumen und Sträuchern sowie Messrauschen) und F. (Baustellenaktivität). Die neuen Klassen entstehen zugunsten einer verbesserten Standardabweichung in den Klassen A. und B. Die Erosion (Klasse C.) und Akkumulation (Klasse D.) gewinnen jeweils an Segmenten und somit einer weiteren Unterteilung der Prozesse nach unterschiedlichen Magnituden dazu, können aber keine signifikante Verbesserung der Standardabweichung nachweisen. Die Veränderung der Niveaus (③ und ④) ist in den Abbildungen B.11b und B.11c weiterhin zu erkennen. Bei k=14 ist zu sehen, dass es eine deutlich bessere Segmentierung der Wiesenbereiche gibt (Abb. 6.12). Die einzelnen Felder sind auch in den Segmenten zunehmend abgegrenzt (Abb. B.7),

und in Tabelle 6.3 ist die niedrige Standardabweichung bei den Segmenten 7 und 11 zu erkennen. Segment 2 zeigt eine erhöhte Standardabweichung. Abbildung B.7 macht sichtbar, dass in Segment 2 weiterhin Teile der Erosionsrinne mit Teilen der Wiese zusammengefasst werden.

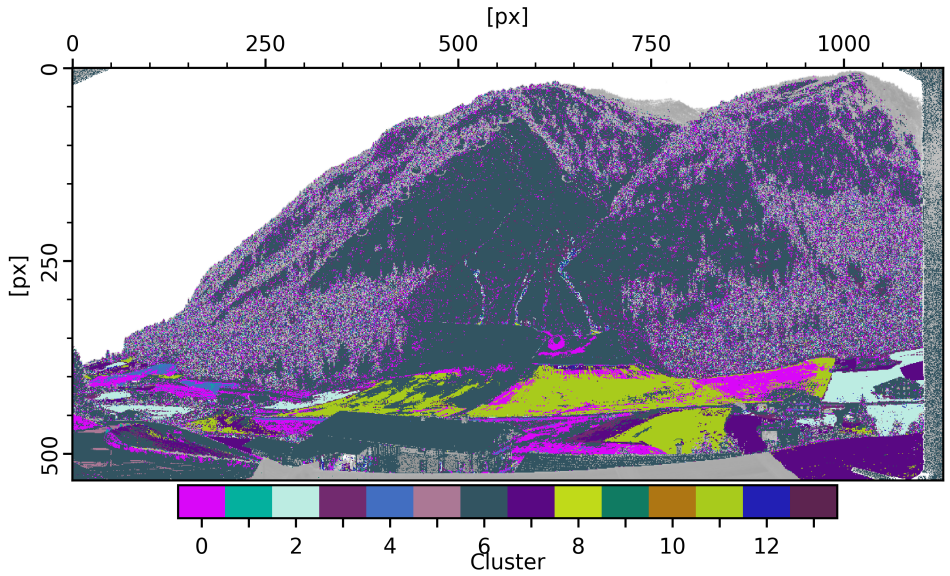


Abb. 6.10.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für k=14.

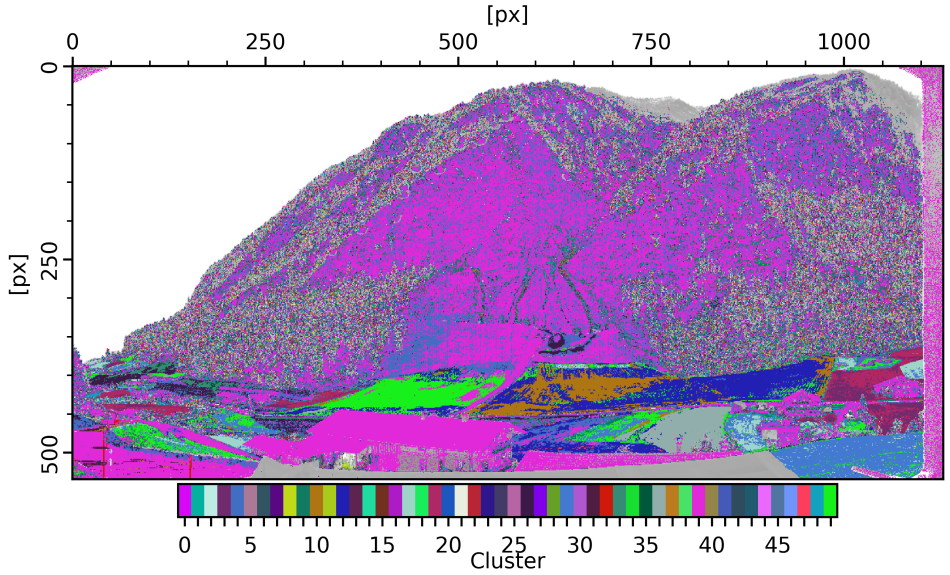


Abb. 6.11.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für k=50.

Tab. 6.3.: Zusammenfassung der Ergebnisse für k=14 und aggregierte subjektive Klassifizierung.

Klasse	Segment	Anz. Rasterzellen	[%]	SD [m]
A. (Stabil)	6	228.557	79,2	0,044
	0	46.844		0,086
	3	33.442		0,131
	4	13.407		0,162
B. (Gras + Mäharbeiten)	11	25.166	14,9	0,060
	7	17.887		0,076
	2	17.494		0,158
C. (Erosion)	12	5.249	1,7	0,267
	9	1.554		0,292
D. (Akkumulation)	1	6.099	2,6	0,240
	13	3.309		0,282
	8	1.250		0,290
E. (Vegetation + Messrauschen)	5	6.496	1,6	0,205
	10	1		-
		406.755	100,0	

Tab. 6.4.: Aggregierte subjektive Klassifizierung für k=50.

Klasse	Anz. Segmente	Anz. Rasterzellen	[%]
A. (Stabil)	4	243.550	59,9
B. (Gras + Mäharbeiten)	8	70.707	17,4
C. (Erosion)	3	3.426	0,8
D. (Akkumulation)	3	1.972	0,5
E. (Vegetation + Messrauschen)	31	71.853	17,7
F. (Baustelle)	1	15.247	3,7
	50	406.755	100,0

Am deutlichsten werden die Veränderungen bei k=50. Auffällig ist die neue Klasse E. Dieser Klasse werden 31 Segmente zugeordnet, die als Vegetation oder Messrauschen bestimmbar sind. Klasse A. und B. zeigen eindeutige Ergebnisse, sodass sich jedes Segment einem Prozess zuordnen lässt. Signifikant verbessert zeigen sich die Wiesen (Abb. B.14). Die zugehörigen Standardabweichungen (Tab. B.3 und Abb. B.20b) zeigen ein niedriges Niveau, was für eine optimale Segmentierung spricht. In Klasse C. ist bei Segment 40 (Abb. B.19b) im grünen Bereich am 07.08.2021 eine deutliche Veränderung zu sehen, die über die leichte Niveauverschiebung (③ in Abb. B.11b) hinausgeht. Zudem kann der Mittelwert von Segment 26 der Bauaktivität im blau markierten Zeitraum zugeordnet werden. Die Ausprägung des Mittelwertes ist nur schwach und der Median deutet gar nicht auf das Ereignis hin. Daher ist weiterhin nur eine schwache Extraktion der Prozesse möglich.

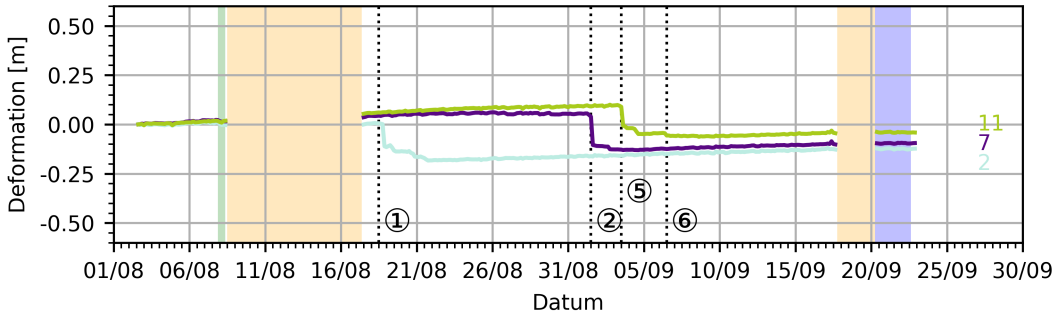


Abb. 6.12.: Median der Zeitreihen von Klasse B. für k=14.

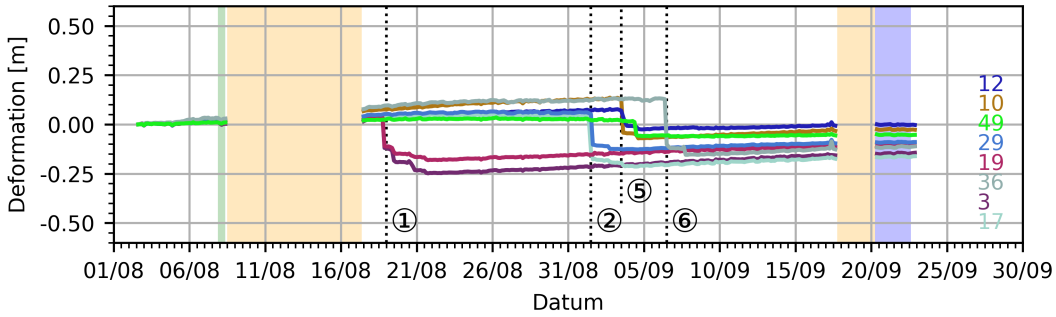


Abb. 6.13.: Median der Zeitreihen von Klasse B. für k=50.

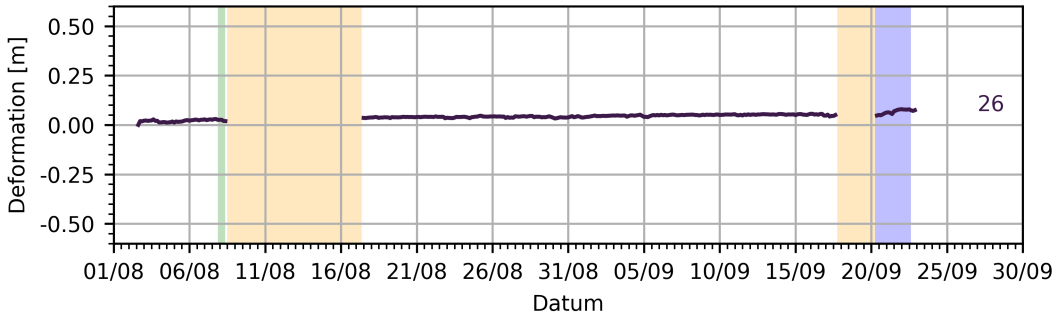
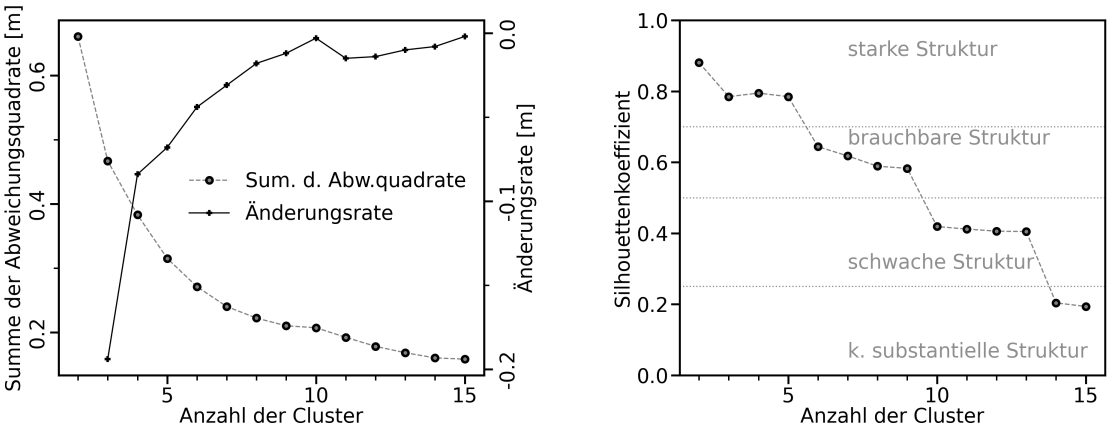


Abb. 6.14.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse F. für k=50.

Die bisher beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass bei der Auswahl der kompletten Szene die Komplexität in den Daten durch den hier vorgestellten Algorithmus auf Basis der Streckenveränderung über die Zeit nicht vollumfänglich modelliert werden kann. Dies wird insbesondere in der Tabelle 6.4 ersichtlich. Denn hier ist zu sehen, dass 17,7 % der Daten durch 31 Segmente beschrieben werden, also mehr als der Hälfte von 50 Segmenten. Dies spricht für die Varianz und Komplexität der vorliegenden Daten. Es wird vermutet, dass eine zielgerichtete Modellierung erreicht werden kann, indem eine Reduktion der Komplexität entweder durch eine vorangestellte Filterung erfolgen kann oder die Messszene räumlich in der Weise limitiert wird, dass nur noch wenige relevante Prozesse zu segmentieren sind.

Mit den bisher semiautomatisch generierten Informationen wird ein Bereich von 200 x 180 Pixeln ausgewählt (Abb. 6.1), der die drei Erosionsrinnen als auch die Baustellenaktivität beinhaltet. Der Bereich wird auf 36.000 Zeitreihen reduziert und hat jetzt eine Größe von etwas weniger als 10 % des ursprünglichen Datensatzes. Der ausgewählte Bereich wird verwendet, um die zuvor beschriebene Methode in einer weiteren Iteration erneut durchzuführen. Die Summe der Abweichungsquadrate und der Silhouettenkoeffizient werden für verschiedene Modelle (k=2 bis 15) berechnet. Der Silhouettenkoeffizient deutet auf eine verbesserte Datenstruktur gegenüber der Berechnung der vollumfänglichen Szene hin. Trotz der besseren Struktur liegen weiterhin mehrdeutige Ergebnisse vor, da keine klaren Maxima oder Minima im Graph erkennbar sind. Analog zu dieser Betrachtung ist kein eindeutiger Ellenbogen bei den Summen der Abweichungsquadrate zu erkennen. Aufgrund der vorliegenden Daten wird ein kombinierter Ansatz bei der Auswahl eines geeigneten k gewählt. Der reduzierte Bereich wird mittels eines Modell k=9 (Letzter Silhouettenkoeffizient in Abb. 6.15b, bevor nach Tab. 6.1 keine brauchbare Struktur mehr vorhanden ist und zusätzlich ein Ellenbogen in Abb. 6.15a vermutet werden kann) segmentiert.



(a) Summen der Abweichungsquadrate. **(b)** Silhouettenkoeffizienten.

Abb. 6.15.: Kombinierte Betrachtung der beiden Auswahlkriterien - Summen der Abweichungsquadrate und Silhouettenkoeffizient - im räumlich reduzierten Bereich.

Im Modell k=9 werden die Prozesse in weitere Subprozesse aufgeteilt (Abb. 6.16). Tabelle 6.5 zeigt, dass eine eindeutige Zuordnung und deren subjektive Interpretation möglich ist. Der stabile Bereich wird in zwei Segmenten dargestellt und die dynamischen Prozesse werden in sieben weiteren Segmenten beschrieben. In Abb. 6.17 ist zudem bei a. eine markante Änderung in den Zeitreihen zu erkennen. Bei einer nachträglichen Begutachtung der Scandaten fällt auf, dass bereits in der Nacht vom 04. auf den 05.08.2021 durch Regengüsse die Erosion aktiviert wurde. Der Umstand, dass dieses Detail der detektierten Prozesse mit Hilfe dieser Auswertung zum Vorschein kommt, spricht für die hier vorgestellte Methode. Auffällig ist zudem, dass die Standardabweichung der jeweiligen Segmente bei k=9 insgesamt niedriger wird und zwischen den Segmenten weniger variiert. Das ist ein Indiz für eine Segmentierung mit hochgradig homogenen, ähnlichen Zeitreihen und wenig Variation innerhalb der Segmente selbst. Es kann geschlussfolgert werden, dass die limitierte Szene auf Basis der Streckenveränderung über die Zeit innerhalb eines Modells von k=9 Segmenten ein aussagekräftiges Ergebnis liefert.

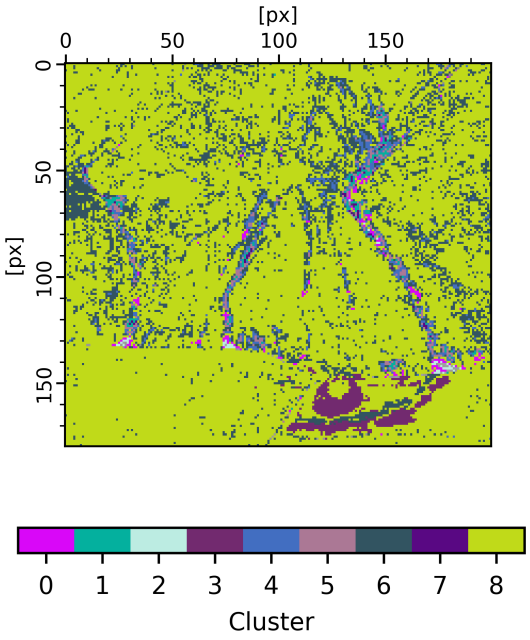


Abb. 6.16.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis im limitierten Bereich für k=9.

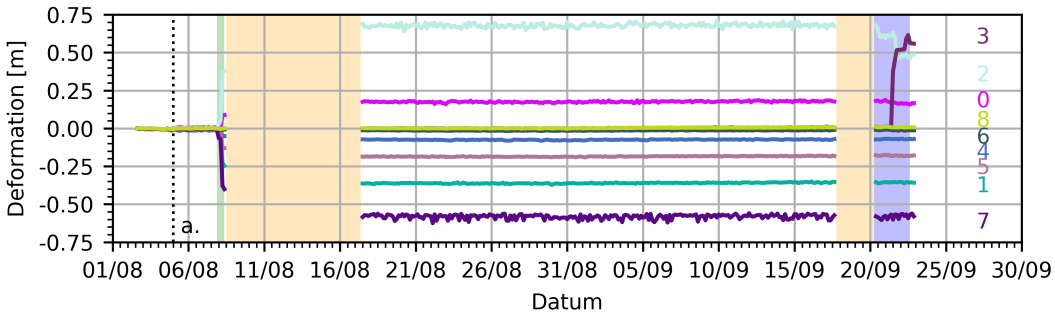


Abb. 6.17.: Median aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung im limitierten Bereich (k=9).

Tab. 6.5.: Zusammenfassung der Ergebnisse im limitierten Bereich für k=9.

Segment	Anz. Rasterzellen	[%]	SD [m]	Interpretaion
6	5.713	15,9	0,018	Stabil
8	27.638	76,9	0,011	
0	218	0,6	0,099	Akkumulation im Zuge der Erosion
2	197	0,5	0,081	Akkumulation im Zuge der Erosion & Abtrag durch Baggerarbeiten
3	50	0,1	0,151	Massenverlagerung per Bagger aus der Querrinne zum darunterliegenden Sammelplatz
1	706	2,0	0,006	Erosion I
4	934	2,6	0,037	Erosion II
5	409	1,1	0,064	Erosion III
7	61	0,2	0,132	Erosion IV
	35.926	100,0		

6.1.3. Zeitreihensegmentierung mittels extrahierter Merkmale auf Grundlage Gaußscher Mischmodelle (GMM)

6.1.3.1. Methode

Die zuvor präsentierte Methode zeigt, dass insbesondere bei der Nutzung der vollumfänglichen Szene die Anzahl der einzelnen Prozesse als auch die Varianzen aufgrund der Vielfalt an Vegetation, Gebäuden, Felsen und Straßen hoch sind. Die Segmentierung der Szene mittels k-Means liefert anhand der Streckenänderung als maßgebliches Feature keine eindeutig klassifizierbare Datenstruktur. Fulcher (2017) führt aus, dass der Vergleich von sequentiellen Daten über die Zeit für einige Anwendungen durchaus zu einer hohen Klassifizierungsgenauigkeit führen kann. Doch der Vergleich von Zeitreihen kann sehr rechenintensiv sein, und es wird kein tiefergehendes Verständnis der Merkmale von Zeitreihen in verschiedenen Clustern vermittelt, die für eine erfolgreiche Segmentierung entscheidend sind (Fulcher, 2017). Fulcher schlägt alternativ die Verwendung einer merkmalsbasierten Darstellung vor, bei der das Problem in Form von interpretierbaren Merkmalen neu formuliert wird. Mittels eines merkmalsbasierten Ansatzes zur Segmentierung von Zeitreihen wird jede Zeitreihe in eine Auswahl von globalen Merkmalen (wie z. B. Maße für ihren Trend, ihre Entropie, ihre Verteilung, absolute Maxima oder Parameter einer Fast Fourier Transformation) umgewandelt (Fulcher & Jones, 2014). Merkmalsbasierte Repräsentationen von Zeitreihen werden anhand umfangreicher Zeitreihenanalyseverfahren erstellt (Fulcher et al., 2013). Für die Merkmalsextraktion wird in dieser Arbeit das auf Python basierende Softwarepaket tsfresh benutzt (Christ et al., 2018). tsfresh bietet 63 Methoden zur Charakterisierung von Zeitreihen, mit denen insgesamt 794 Zeitreihenmerkmale berechnet werden (Schritt 8, Abb. 6.18). Z. Yang et al. (2021) stellen beispielhaft die von tsfresh extrahierten Features dar. Christ et al. (2016) führen aus, dass die resultierenden Merkmale entweder für unüberwachtes oder überwachtes maschinelles Lernen verwendet werden können. Beim überwachten maschinellen Lernen werden statistisch signifikante Merkmale in Bezug zu Trainingsdaten ausgewählt. Zu diesem Zweck werden automatisiert Hypothesentests von der Software durchgeführt (Christ et al., 2016).

Die extrahierten Features können nicht mehr die Voraussetzung erfüllen, dass in allen Dimensionen die gleichen Einheiten angewendet werden können. Deswegen kann keine Segmentierung mittels k-Means durchgeführt werden. In diesem Fall finden Gaußsche Mischmodelle (GMM) ihre Anwendung. GMM sind eine unüberwachte Segmentierungsmethode (Patel & Kushwaha, 2020), die mehrdimensionale Gauß-Verteilungen an die Daten anpassen. Diese Verteilungen enthalten eine vollständige Kovarianzmatrix, d. h., sie erlauben eine unterschiedliche Skalierung in allen Merkmalsdimensionen (Winiwarter et al., 2022a), was den wesentlichen Vorteil gegenüber k-Means beschreibt. GMM ist bei Python im Programmpaket scikit-learn implementiert und nutzt den Erwartungs-Maximierungs-Algorithmus zur Schätzung von Mittelwert und Kovarianz für die Clusterschwerpunkte (Pedregosa et al., 2011).

Die Eingabeparameter für ein Clustering mittels GMM sind analog zu Kapitel 6.1.2.1. Auch hier ist es als Nachteil anzusehen, dass im Vorhinein die Anzahl der Segmente bekannt sein muss. Die Modelle werden für eine verschiedene Anzahl an Segmenten berechnet. Nach Kulkarni und Desai (2017) bestünde die einfachste Variante darin, das Modell nach der Maximum-Likelihood-Methode auszuwählen. Allerdings kann eine Maximierung durch zusätzliche Freiheitsgrade zu einem Overfitting des jeweiligen

Modells führen (Kulkarni & Desai, 2017). Daher wird ein robusteres und genaueres Kriterium benötigt, das die Verwendung zusätzlicher freier Parameter bestraft (Dziak et al., 2019). Für diesen Zweck eignen sich die beiden Informationskriterien AIC (Akaike Informationskriterium) nach Akaike (1998) und BIC (Bayes'sche Informationskriterium) nach G. Schwarz (1978) (Schritt 9, Abb. 6.18). Nach Vrieze (2012) ist das BIC bei der Modellauswahl konsistent. Es wählt garantiert das wahre Modell aus, wenn der Stichprobenumfang wächst, solange das wahre Modell unter den in Frage kommenden Modellen ist (Dziak et al., 2019). Das AIC wählt dagegen asymptotisch das Modell aus, das den mittleren quadratischen Fehler der Schätzung minimiert (Vrieze, 2012). Das AIC ist dagegen nicht konsistent, da die Möglichkeit besteht, ein unnötig komplexes Modell zu wählen, wenn die Stichprobe unendlich groß wird (Dziak et al., 2019). In der Praxis hat sich gezeigt, dass das AIC zu Overfitting und das BIC zu Underfitting neigt. Aus diesem Grund ist analog zu Kapitel 6.1.2.1 zu beachten, dass die beiden Kriterien nicht konkurrent betrachtet werden dürfen und mit Hilfe des Erfahrungsschatz eines Auswerters zu bewerten sind.

Die Gleichungen zur Berechnung von AIC und BIC definieren sich nach Kulkarni und Desai (2017) folgendermaßen:

$$AIC = 2p - 2\ln L \tag{6.8}$$

$$BIC = p\ln N - 2\ln L \tag{6.9}$$

, wobei p die Anzahl der freien Parameter des Modells und L die Likelihood ist.

Für eine Auswahl einer unterschiedlichen Anzahl von Clustern wird die Berechnung des AIC und BIC durchgeführt. Das Ergebnis wird in einem X-Y-Plot eingetragen und verglichen. Nach de Wit et al. (2012) entspricht die Minimierung des BIC der Maximierung der empirischen Genauigkeit des Modells für eine große Anzahl von Beobachtungen. Die Schlussfolgerung für das AIC ist analog. Nach Auswahl eines Modells wird die eigentliche Segmentierung durchgeführt und bewertet. Es wird eine räumliche Darstellung (Schritt 10, Abb. 6.18) der Ergebnisse als auch eine Darstellung der Zeitserien (Schritt 11, Abb. 6.18) erzeugt.

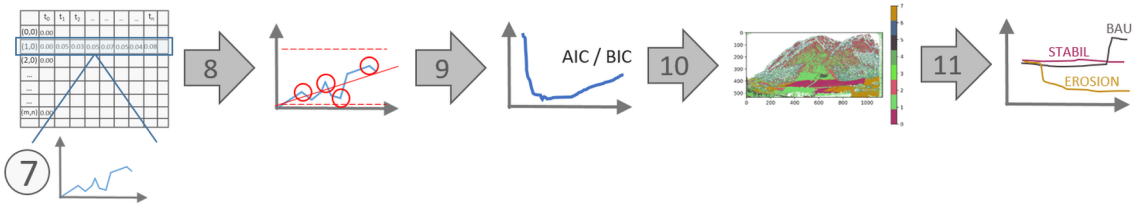


Abb. 6.18.: Workflow zur Zeitreihensegmentierung mittels tsfresh und GMM.

6.1.3.2. Resultate

Analog zu Kapitel 6.1.2.2 werden aus Gründen der Übersichtlichkeit Ergebnisdarstellungen teilweise im Anhang C dargestellt. Zunächst werden für eine verschiedene Anzahl an Segmenten (2 bis 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100 und 150) die Clusterberechnungen auf Basis von extrahierten Merkmalen aus den Zeitreihen durchgeführt. Nach Extraktion der Zeitreihen aus der Punktwolke und der entsprechenden Filterung

nutzt das merkmalsbasierte Clustering 412.260 Zeitreihen. Aus den Berechnungen wird das AIC und BIC (Abb. 6.19 und Tab. C.1) abgeleitet und interpretiert. Es ist ein schwaches Minimum des BIC zwischen 12 und 25 Segmenten zu erkennen, wobei bei 12 das absolute Minimum dargestellt wird. Trotzdem ist das Ergebnis nicht eindeutig, was auf eine schwache Struktur in den Daten deutet. Demgegenüber ist bei der Begutachtung des AIC ein absolutes Minimum für ein Modell mit 100 Segmenten zu erkennen. Für die Bewertung der vollumfänglichen Szene werden daher auf Grundlage des AIC und BIC zwei Modelle mit 12 und 100 Segmenten ausgewählt.

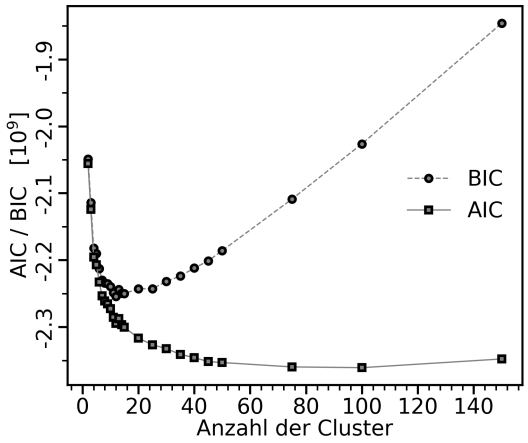


Abb. 6.19.: BIC und AIC für verschiedene Modellberechnungen mittels GMM.

In Kapitel 6.1.3.1 wird beschrieben, dass das BIC bei der Modellauswahl konsistent ist und garantiert das wahre Modell auswählt, wenn es sich unter den in Frage kommenden Modellen befindet. Das Segmentierungsergebnis wird zunächst in ein räumliches Bild übertragen (Abb. 6.20). Die Grafik zeigt ein kontrastreiches Bild, woraus sich visuell klar abzugrenzende Bereiche selektieren lassen. Die gesuchten Strukturen, wie die Erosionsrinnen oder der Baustellenbereich, sind deutlich erkennbar. An den Wiesen im Talbereich scheinen Kanten und Abgrenzungen gegenüber benachbarten Bereichen im Vergleich zum k-Means-Algorithmus klarer differenzierbar zu sein. Neben der räumlichen Darstellung sind die jeweiligen Segmente in der Zeitdomäne zu betrachten. Die Magnitude der Streckenänderung an sich ist in diesem Unterkapitel nicht mehr das alleinige Merkmal, worauf die Segmentierung optimiert ist. Es wird vermutet, dass Merkmale wie das absolute Maximum Erosionsrinnen mit Abtrag und Akkumulation in einem gemeinsamen Segment zusammenfassen. Die Betrachtung des Median ist daher nicht mehr zielführend, da der Ausgleich von positiven und negativen Werten für eine Nulllinie sorgen. Da die Beschreibung signifikanter Merkmale, die das Modell definieren, nicht Thema dieser Arbeit ist, wird versucht, in Kooperation des Mittelwerts aller Zeitreihen eines Segmentes und dazugehöriger Standardabweichung des Mittelwerts erste Erkenntnisse und subjektive Urteile abzuleiten.

Mit Hilfe der räumlichen als auch zeitlichen Darstellung der Daten lassen sich die jeweiligen Segmente subjektiv durch den Anwender einzelnen Klassen zuordnen. Die Definition der Zeitpunkte verschiedener Ereignisse wird analog zu Kapitel 6.1.2.2 fortgeführt. Die Bezeichnung der subjektiv ausgewählten Klassen ist für jedes Kapitel individuell zu betrachten. Für das Modell mit 12 Segmenten kommen fünf Klassen in Frage. Klasse A. mit stabilen Bereichen, Klasse B. mit den Wiesenbereichen, Klasse C. mit

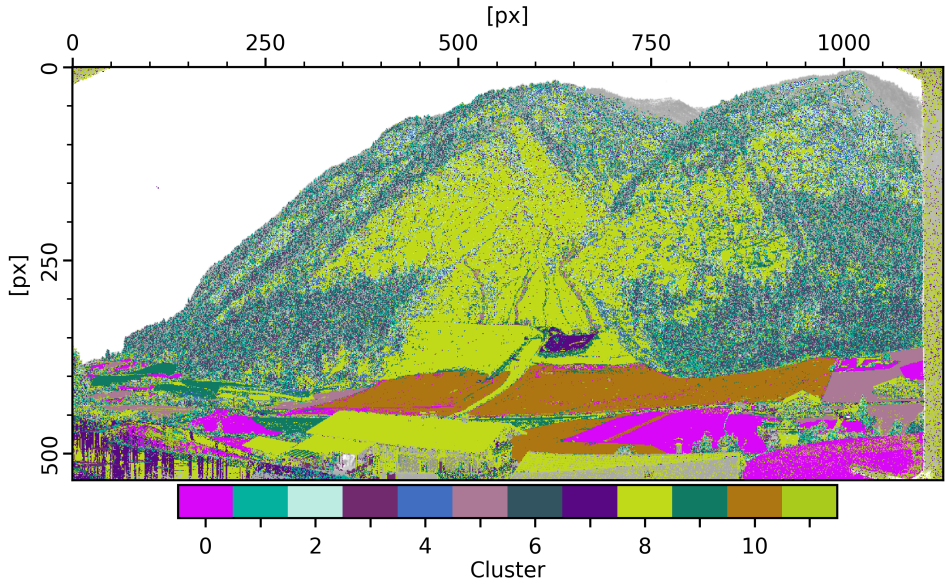


Abb. 6.20.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für 12 Cluster.

den Erosionsrinnen, Klasse D. mit der Bauaktivität und eine Klasse E. mit Segmenten, die sich subjektiv keinem Prozess zuordnen lassen. Klasse E. beinhaltet überwiegend größere Vegetation (Bäume und Sträucher) sowie generelles Messrauschen in den ausgewählten Segmenten. Die Klassifizierung wird in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass sechs von zwölf Segmenten keinen Beitrag zum Informationsgehalt der Szene leisten. Dies entspricht 45,4 % der Daten. Cluster 8 in (Abb. 6.20) zeigt eindeutig stabile Areale und keine Besonderheiten in den Zeitreihen der Mittelwerte und der Standardabweichung (Abb. C.5 und C.6). Lediglich Zeitpunkte mit schlechten Wetter sind an der Datenqualität zu erkennen (Abb. C.6). Die Cluster 0 und 10 zeigen deutlich Bereiche mit Wiese. Auch Cluster 9 kann dem zugeordnet werden, wobei hier weitere Bereiche im Hang eingruppiert werden und es nicht mehr eindeutig nur Wiese ist.

Tab. 6.6.: Aggregierte Zusammenfassung der subjektiven Klassifizierung für die Modellberechnung mit 12 Clustern.

Klasse	Anz. Segmente	Anz. Rasterzellen	[%]
A. (Stabil)	1	123.917	30,1
B. (Wiese)	3	73.482	17,8
C. (Erosionsrinne)	1	9.426	2,3
D. (Baustelle)	1	18.092	4,4
E. (Noise)	6	187.343	45,4
	12	412.260	100,0

Bei den Wiesen sind die Zeitpunkte der Mäharbeiten (②, ⑤, ⑥, ⑦ und ⑧) automatisiert detektiert. Abweichungen bei c. zeigen wieder den Einfluss von schlechtem Wetter auf die Daten. In den Standardabweichungen sind die Ereignisse auch teilweise extrahierbar (Abb. C.7).

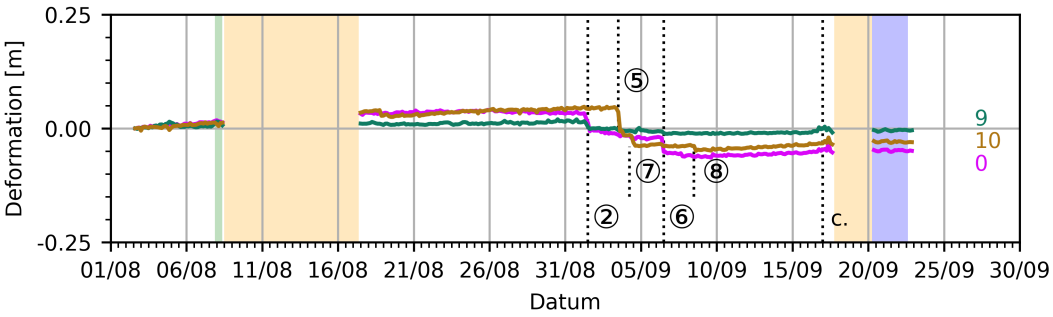


Abb. 6.21.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse B. für 12 Cluster.

Des Weiteren lassen sich die Segmente 5 (Erosion) und 7 (Baustelle) separieren. In der räumlichen Abbildung C.3 ist jedoch zu erkennen, dass die beiden Segmente nicht exklusiv den beiden Prozessen zugeordnet werden können. Die Erosion wird zusammen mit Wiesenbereichen segmentiert und die Baustelle zusammen mit Bereichen einer Straße. Aus diesem Grund wäre es an diesem Punkt berechtigt, auch über andere subjektive Klassifizierungsmöglichkeiten zu diskutieren. Wenn zusätzlich die Mittelwerte der Zeitreihen betrachtet werden (Abb. C.8), fällt auf, dass die gesuchten Prozesse nicht zu erkennen sind. Es dominieren weiterhin Bewegungsmuster der Wiesen, die weiterhin in den Segmenten vorhanden sind. Im Gegensatz dazu liefert die Darstellung der Standardabweichung wertvolle Hinweise. In Abb. 6.22 sind zu den Zeitpunkten a., b. und c. weiterhin die nachlassende Qualität der Daten durch schlechtes Wetter zu sehen. Im blauen Bereich ist jedoch in Segment 7 eine signifikante Änderung der Standardabweichung zu sehen, was Rückschlüsse auf die Baustellenaktivität vermuten lässt. Weniger signifikant, aber noch erkennbar ist zum Zeitpunkt ③ die Änderung im Niveau der Standardabweichung zu sehen. Dies deutet auf die Erosion hin, ist aber in seiner Aussage nicht zuverlässig zu belegen.

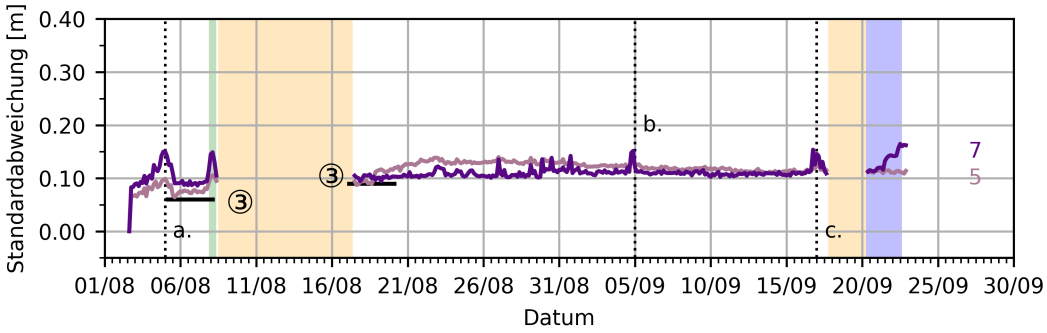


Abb. 6.22.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse C. (5) und D. (7) für 12 Cluster.

Vollständigkeitshalber sind in der Anlage C die Mittelwerte (Abb. C.9) und die Standardabweichung (Abb. C.10) der Zeitreihen aus Klasse E. dargestellt. Gegenüber den restlichen Betrachtungen gibt es hier keine relevanten Erkenntnisse, die diese Arbeit betreffen. Die gesuchten Prozesse werden nicht eindeutig detektiert. Es erhärtet sich die bereits erwähnte Vermutung, dass die zugrundeliegenden Daten nicht ausreichend alle auftretenden Phänomene exklusiv clustern.

Tab. 6.7.: Aggregierte Zusammenfassung der subjektiven Klassifizierung für die Modellberechnung mit 100 Clustern.

Klasse	Anz. Segmente	Anz. Rasterzellen	[%]
A. (Stabil)	4	53.181	12,9
B. (Wiese)	16	65.667	15,9
C. (Erosionsrinne)	2	1.968	0,5
D. (Baustelle)	4	6.150	1,5
E. (Noise)	74	285.294	69,2
	100	412.260	100,0

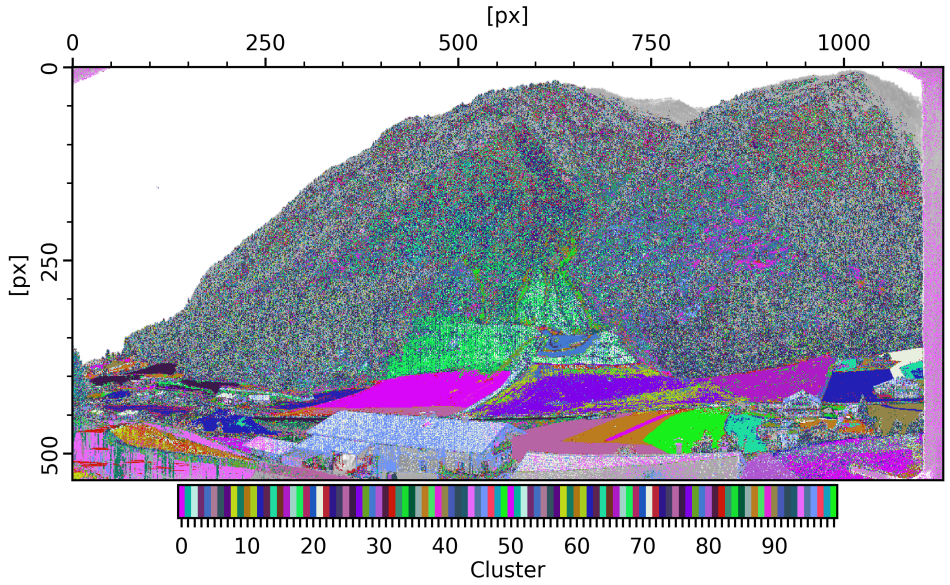


Abb. 6.23.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für 100 Cluster.

In einem weiteren Schritt wird versucht die Komplexität der Szene durch ein Modell mit 100 Segmenten abzubilden. Tabelle 6.7 und Abbildung 6.23 zeigen, dass versucht wird die Komplexität der Szene durch die Vielzahl an Clustern abzubilden. Die gesuchten Prozesse lassen sich im Wesentlichen subjektiv klassifizieren, sind aber auf den ersten Blick nicht visuell zu extrahieren. Es ist ersichtlich, dass im räumlichen Bild keine klare Struktur mehr zu erkennen ist. Das Bild muss differenziert betrachtet werden. Mit Hilfe der subjektiven Klassifizierung lassen sich lediglich aus 26 Clustern Informationen herauslesen. Die restlichen 74 Segmente beschreiben etwa 70 % der Daten, aus denen kein Mehrwert generiert werden kann (Abb. C.15). Diese Cluster lassen sich als Vegetation in Form von Bewuchs - wie Sträucher oder Bäume - und generelles Messrauschen beschreiben. Die zuvor beschriebenen Klassen beim Clustering mit 12 Segmenten (Tab. 6.6) werden weiter unterteilt. Bei der Klassifizierung der Wiese (B.) ist visuell eine weitere Verbesserung zu erkennen (Abb. C.12). Außerdem lassen sich in den Zeitserien einzelne Ereignisse (Zeitpunkte, an denen Wiese gemäht wird) klar identifizieren (Abb. 6.24).

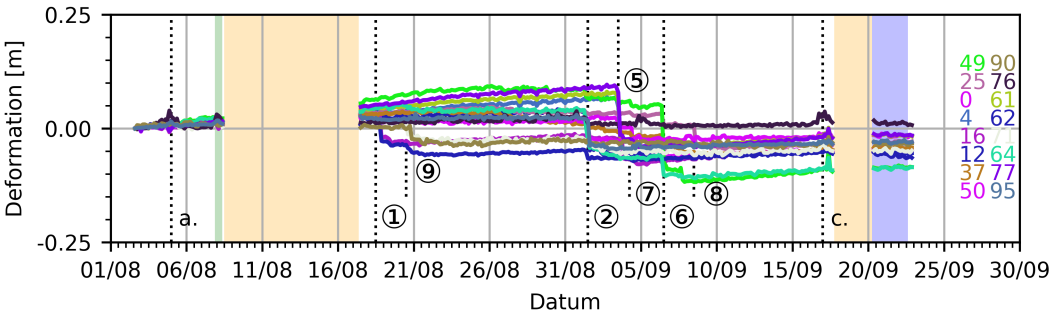


Abb. 6.24.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse B. für 100 Cluster.

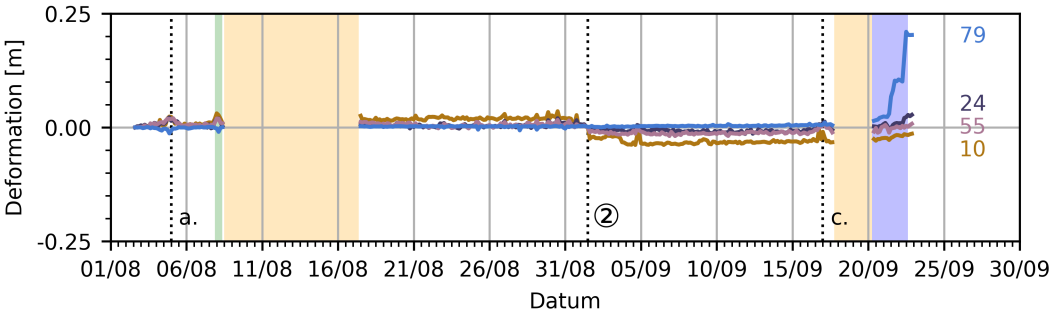


Abb. 6.25.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse D. für 100 Cluster.

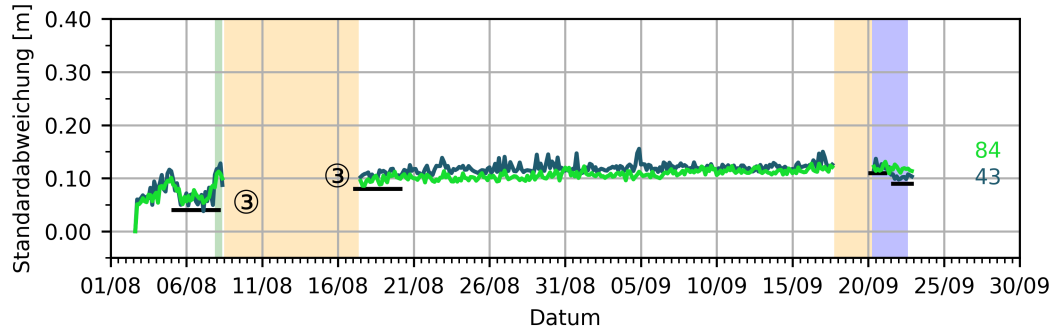


Abb. 6.26.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse C. für 100 Cluster.

Ein Erkenntnisgewinn ist zudem in Klasse D. (Baustelle - Abb. 6.25 und C.14) zu sehen. Segment 79 zeigt deutlich ein Signal im blau markierten Zeitraum, was für den gesuchten Prozess spricht. Die Segmente 10, 24 und 55 deuten visuell auf die Baustelle (Abb. C.14), jedoch nicht in den Zeitreihen (Abb. 6.25). Vielmehr sind Artefakte durch die teilweise segmentierte Wiese (② in Abb. C.14) zu erkennen. In den beiden Klassen A. (Stabil - Abb. C.11 und C.16) und C. (Erosionsrinne - Abb. C.13 und C.19) ist der Sachverhalt ähnlich. Artefakte (② und ⑥ in Abb. C.16 sowie Abb. C.19) sind sichtbar, jedoch nicht die gesuchten Prozesse. Die Änderung der Standardabweichung für die beiden Segmente von Klasse C. deuten auf die Prozesse (Abb. 6.26). Zum Zeitpunkt ③

ist eine Erhöhung der Standardabweichung ersichtlich und zum Zeitpunkt der Baustelle eine Verminderung. Letzteres deutet auf die Umlagerung akkumulierten Materials im Zuge der Baustellenaktivität. Die Vermutung fußt jedoch auf der Hinzunahme der visuellen Informationen aus den Abbildungen C.11 und C.13.

Durch die hohe Anzahl an ausgewählten Clustern werden die gesuchten Prozesse, zumindest visuell, deutlich extrahiert. Anhand der visuellen Beurteilung funktioniert das besser als beim k-Means-Verfahren. Trotzdem ist auch hier zu sehen, dass die vollumfängliche Szene weiterhin zu komplex ist. Der Informationsgehalt ist zu kleinteilig. Aus diesem Grund wird eine Mehrheit an Clustern für nicht relevante Informationen aufgebraucht, und die relevanten Prozesse werden mit nur 25 % der Daten beschrieben. Analog zu Kapitel 6.1.2.2 reicht die Streckenänderung alleine als zugrundeliegende Datenbasis nicht aus, die komplette Szene modellieren zu können. Eine Optimierung der Methodik wird hier ebenfalls erwartet, wenn zielgerichtet ein Filter oder eine Limitierung des räumlichen Bereichs angewendet wird. Entsprechend der Abbildung 6.1 und Kapitel 6.1.2.2 wird ein Bereich mit 36.000 Zeitreihen ausgewählt.

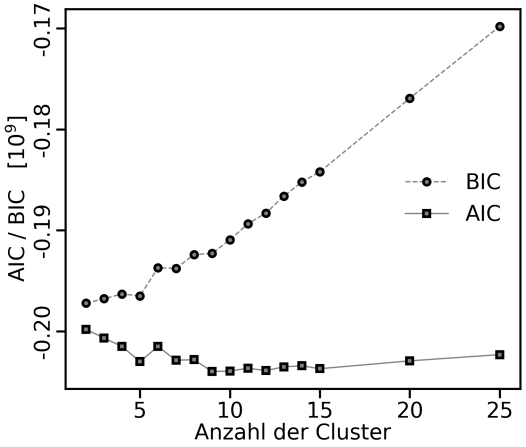


Abb. 6.27.: BIC und AIC für verschiedene Modellberechnungen mittels GMM im limitierten Bereich.

Zunächst wird für diesen Bereich das AIC und BIC betrachtet, welche aus verschiedenen Modellvarianten für 2 bis 15, 20 und 25 Segmente berechnet wird (Abb. 6.27 und Tab. C.2). Das BIC zeigt für zwei bis fünf Segmente ein Minimum. Ein eindeutiger Wert lässt sich jedoch nicht ablesen. Bei zusätzlicher Betrachtung des AIC wird ein absolutes Minimum für 9 Segmente vorgeschlagen. Eine Bewertung ist mehrdeutig möglich. Für ein Modell mit vier Clustern lässt sich eine brauchbare Struktur erahnen. Abbildung 6.28 zeigt eine klar definierte Struktur, aus der die Erosionsrinnen und die Baustelle selektierbar sind.

99,87 % der rasterbasierten Zeitreihen werden einem Segment zugeordnet. In Abbildung 6.29 werden zunächst die Mittelwerte betrachtet. Cluster 0 und 2 zeigen im grünen und blauen Bereich eindeutig Veränderungen, die auf die gesuchten Prozesse deuten. Die Magnitude der Mittelwerte ist jedoch nicht so ausgeprägt wie der Median bei der Segmentierung mittels k-Means (Abb. 6.17). Das zeigt, dass hier nicht die Streckenänderung an sich das segmentierte Feature ist, sondern deren abgeleitete Merkmale. Die Erosionsrinnen bestehen bspw. aus Ab- und Auftrag, was sich im Mittel in etwa ausgleicht, aber durch Merkmale wie bspw. das absolute Maximum als gleichwer-

tiger Prozess segmentieren lässt. Das spricht dafür, dass die hier vorgestellte Methode sich dafür eignet, Prozesse als Ganzes automatisiert zu clustern statt Bereiche mit gleichartigen geometriebezogenen Magnituden. Entsprechend der Tabelle 6.8 werden 7,5 % der Zeitreihen den Erosionsrinnen und 5,8 % der Baustellenaktivität zugewiesen. Subjektiv lassen sich Cluster 1 als stabiler Bereich (72,9 % der Zeitreihen) und Cluster 3 als Bereich mit Vegetation (13,8 % der Zeitreihen) deuten. Unter Hinzunahme der Standardabweichung (Abb. 6.30) können die Prozesse zusätzlich in der Zeit selektiert werden. Es fällt zudem auf, dass die Standardabweichungen der jeweiligen Cluster homogener erscheinen als die Cluster, die in der vollumfänglichen Szene segmentiert werden. Das ist ein Indiz für ein zuverlässiges Segmentierungsergebnis. Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass im limitierten Bereich ein aussagekräftiges Ergebnis mittels der hier vorgestellten Methode möglich ist.

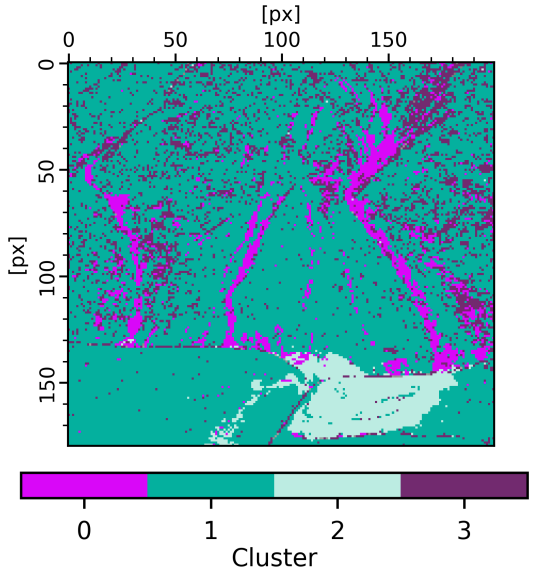


Abb. 6.28.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis im limitierten Bereich für 4 Cluster.

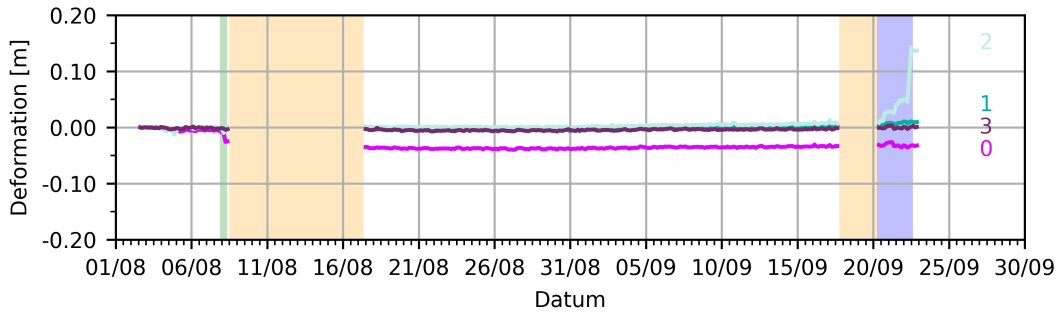


Abb. 6.29.: Mittelwert aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung im limitierten Bereich (4 Cluster).

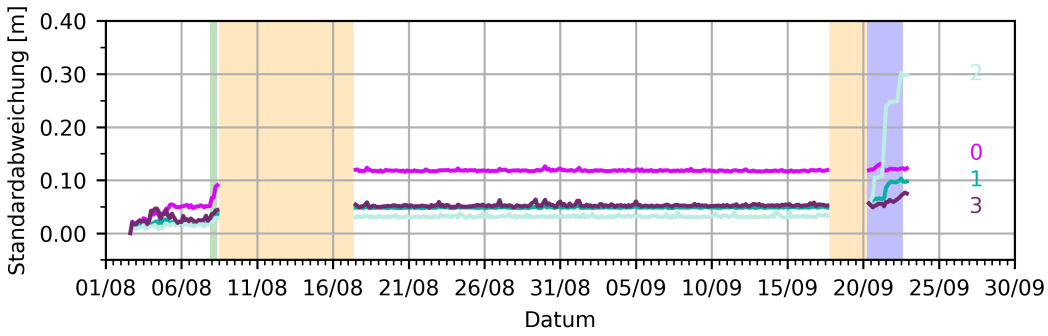


Abb. 6.30.: Standardabweichung aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung im limitierten Bereich (4 Cluster).

Tab. 6.8.: Aggregierte Zusammenfassung der subjektiven Klassifizierung für die Modellberechnung mit 4 Clustern im limitierten Bereich.

Klasse	Anz. Segmente	Anz. Rasterzellen	[%]
A. (Stabil)	1	26.192	72,9
B. (Vegetation)	1	4.971	13,8
C. (Erosionsrinne)	1	2.704	7,5
D. (Baustelle)	1	2.087	5,8
	4	35.954	100,0

6.2. Stufe II: Zeitreihenanalyse von räumlich hochauflösenden 3D-Daten

In Kapitel 6.1 werden zwei Verfahren vorgestellt, die auf Basis komprimierter Daten innerhalb eines automatisierten Prozess relevante Informationen extrahieren. Es konnte ein limitierter Bereich (Abb. 6.1) selektiert werden, in dem charakteristische geomorphologische Prozesse stattfinden. Zu Beginn des hier übergeordneten Kapitels wurde die Anwendung der Methoden 4D-OBC (Anders et al., 2020) und eines adaptierten Kalman-Filters auf M3C2-Distanzen (Winiwarter et al., 2022a) innerhalb eines echtzeitnahen Assistenzsystems in Frage gestellt. Es wird vermutet, dass Latenzen zwischen der Datenerfassung und der Informationsbereitstellung durch die Anwendung der Methoden auf einen räumlich limitierten Bereich optimiert werden können. Diese Arbeit stellt die Anwendung der Methoden in den Vordergrund und es findet keine Evaluierung hinsichtlich unterschiedlicher Parametrisierungen und Prozessierungszeiten statt. Im Folgenden werden beide Methoden auf den in Kapitel 6.1 beschriebenen räumlich eingegrenzten Datensatz angewendet.

6.2.1. M3C2-EP mit adaptiver Kalman-Filterung

6.2.1.1. Methode

Zur Extraktion von Informationen über die geomorphologischen Prozesse wird eine neuartige Methode angewendet. Die Methode basiert auf der Auswertung von Zeitserien räumlich verteilter M3C2-Distanzen inklusiver Fehlerfortpflanzung mittels einer adap-

tierten Kalman-Filterung nach Winiwarter et al. (2022a) und Winiwarter et al. (2021). Im ersten Schritt werden mithilfe des M3C2-EP (Winiwarter et al., 2021) bitemporale Änderungen der Oberfläche für jede Epoche berechnet, wobei die erste Epoche als Referenz dient. An dieser Stelle wird keine Filterung der Veränderungen nach statistischer Signifikanz vorgenommen, allerdings wird die Unsicherheit nach Anderson (2019) dokumentiert. Für diesen Berechnungsschritt müssen folgende Parameter ausgewählt werden: Die sphärische Nachbarschaft, ein Projektionsradius (daraus resultierend die Punktdichte pro m^2), die maximale Zylinderlänge, die Streckenungenauigkeit und die Unsicherheit der Winkelmessung. Für jeden räumlichen Bezugspunkt (Corepoint) erhält man eine Zeitserie mit M3C2-EP-Distanzen.

Im nächsten Schritt wird die Veränderung der Distanzen über die Zeit mittels eines Kalman-Filter modelliert. Ein Kalman-Filter repräsentiert ein dynamisches System mit einem Zustandsvektor zu einem Zeitpunkt t_n, einem funktionalen Modell der Beobachtungsgrößen (die Messwerte) und einer Zustandsübertragungsfunktion für die Prädiktion des Zustands und verlangt, dass die Fehler in der erhaltenen bitemporalen Oberflächenänderung normalverteilt sind. Da die Änderungen mit M3C2-EP modelliert sind, wird angenommen, dass diese Bedingung erfüllt ist. Hinsichtlich theoretischer Betrachtungen der Kalman-Filterungen sei auf die Literatur von Heunecke et al. (2013), Niemeier (2008) und Winiwarter et al. (2022a) verwiesen. Der Zustandsvektor des Kalman-Filters enthält die Parameter (hier die geschätzten Distanzwerte) für die jeweiligen Zeitpunkte. Ausgehend von diesem Zustand, kann dann ein zukünftiger Zustand unter Verwendung der Zustandsübertragungsfunktion vorhergesagt werden, die so linearisiert ist, dass sie durch eine Matrix dargestellt werden kann. Dies wird als Prädiktion bezeichnet. Stehen neue Beobachtungen, d. h. Messungen, zur Verfügung, können diese im Aktualisierungsschritt in den Zustandsvektor eingeführt werden. Auch hier kommt ein linearisiertes Modell zum Einsatz, um die Beziehung zwischen Beobachtungen und Parametern darzustellen. Sowohl bei der Prognose als auch bei den Updates wird mit einem Unsicherheitsfaktor gearbeitet. Der Zustandsvektor selbst wird durch eine Kovarianzmatrix ergänzt. Im Prädiktionsschritt steigt die Unsicherheit im Allgemeinen an, da die letzten Beobachtungen zunehmend an Aktualität verlieren. Die zunehmende Unsicherheit über die Zeit aufgrund fehlender Messungen wird durch den Kalman-Filter modelliert. Da das Verhalten der beobachteten Erdoberfläche vor der Analyse nicht bekannt ist, wird in Anlehnung an Labbe (2020) ein gleitendes (diskretes) weißes Rauschmodell angewandt. Es wird angenommen, dass für jeden Zeitpunkt eine zur vorherigen Messung unkorrelierte und zufällige Änderung der M3C2-EP-Distanz eintreten kann, wobei der Erwartungswert dieser Änderung mit dem Mittelwert Null normalverteilt mit einer auszuwählenden Standardabweichung ist. Es wird ein Wert für das Prozessrauschen als Varianz (σ) eingeführt. Nach Winiwarter et al. (2022a) führen große Werte für σ zu einem flexiblen Zeitreihenmodell, wohingegen kleine Werte für σ für eine geglättete Trajektorie sorgen. Die Wahl von σ beeinflusst ebenfalls das erreichbare Signifikanzniveu. Im Allgemeinen führen kleine Werte für σ zu einer starken Glättung und niedrigen Signifikanzniveaus, da nachfolgende Messungen als stärker miteinander korreliert angesehen werden. Der Kalman-Filter wird zudem mit einer Rauch-Tung-Striebel Glättung kombiniert (Rauch et al., 1965), um eine geglättete Zeitreihe zu erzeugen, die sowohl zukünftige als auch frühere Messungen für jeden Zeitpunkt berücksichtigt. Dies ermöglicht auch die Interpolation über Datenlücken hinweg.

6.2.1.2. Resultate

Für die Auswertung werden 318 Scans aus dem räumlich limitierten Bereich zwischen dem 02.08.2021 und 22.09.2021 verwendet. Als Referenzepoche wird der Scan vom 02.08.2021 um 15:00 Uhr ausgewählt. Eine Registrierung der jeweiligen Scans erfolgt über die Prismen (Kap. 5.3.3). Die Werte der Parameter für die Berechnung der M3C2-EP-Distanzen sind in Tabelle 6.9 dokumentiert. Die Parametrisierung der sphärischen Nachbarschaft, des Projektionsradius und die maximale Zylinderlänge basieren auf Schröder et al. (2022). Die Streckenungenauigkeit und die Ungenauigkeit der Winkelmessung wird von Winiwarter et al. (2021) übernommen. Winiwarter et al. (2021) nutzen ein Viertel der Strahldivergenz, da diese an den Punkten $1/e^2$ gemessen wird, was 4σ entspricht, wenn eine Normalverteilung angenommen wird.

Tab. 6.9.: Parametrisierung für die Berechnung des M3C2-EP-Algorithmus.

Parameter	Wert
Sphärische Nachbarschaft	5 m
Projektionsradius	0,5 m
Maximale Zylinderlänge	3 m
Corepoint Punktdichte	0,45 Pkt/m²
Streckenungenauigkeit	0,005 m
Winkelungenauigkeit	0,0675 mrad

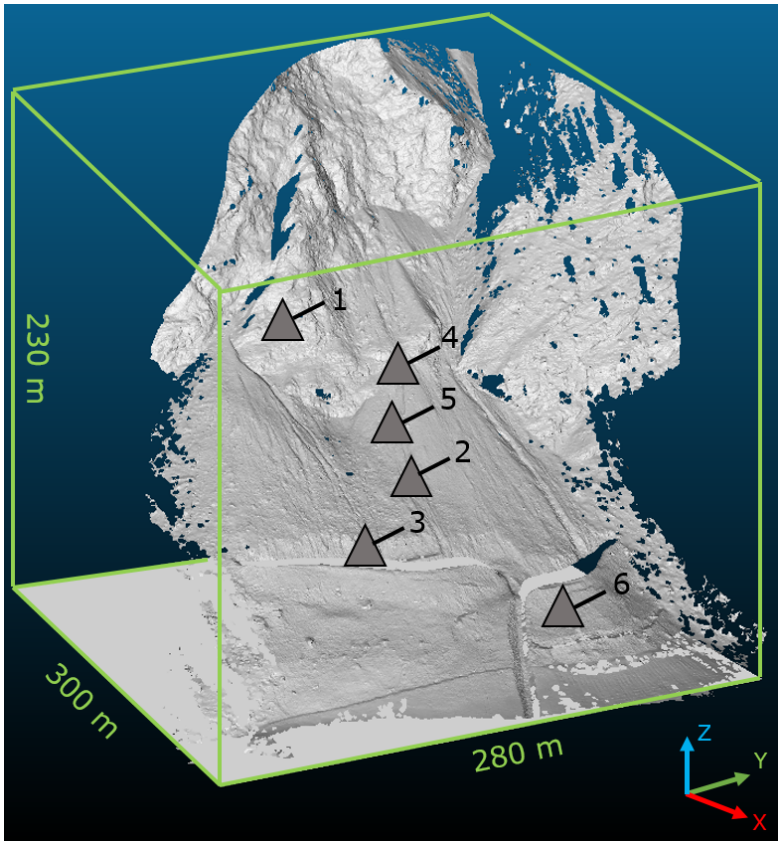
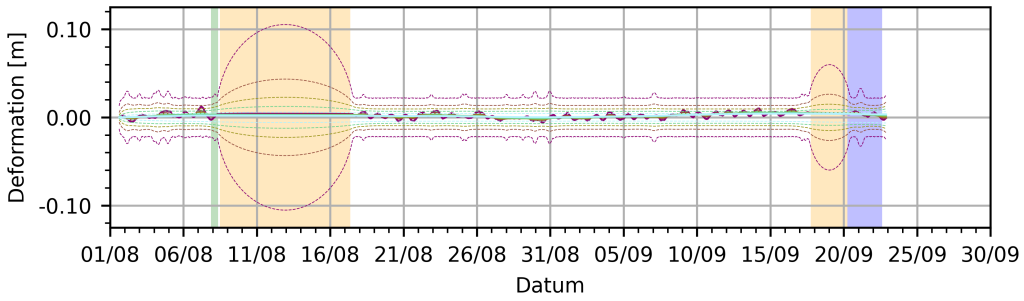
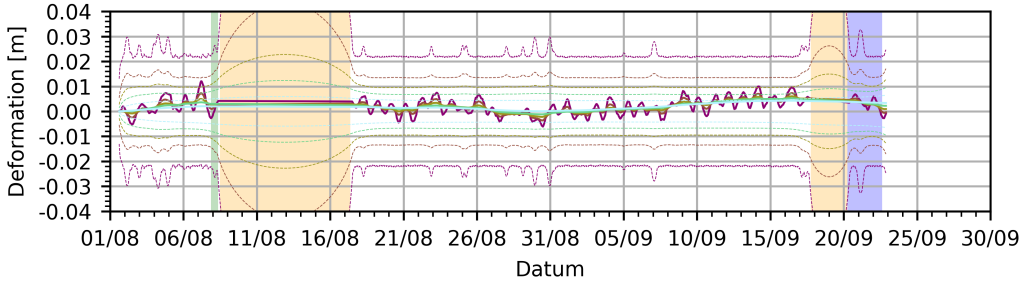


Abb. 6.31.: Übersicht zu den ausgewählten Corepoints aus der 3D-Punktwolke im limitierten Bereich.

Mit Hilfe der genannten Parametrisierung werden innerhalb des limitierten Bereichs (Abb. 6.1) bitemporale M3C2-EP-Distanzen und korrespondierende Unsicherheiten für 73.433 Corepoints bestimmt. Innerhalb dieser Arbeit soll das Potential dieser Methodik dargestellt werden, sodass für sechs ausgewählte Corepoints (Abb. 6.31) die Zeitreihe mittels Kalman-Filterung modelliert wird. Um die Anwendung dieser Methode darzustellen als auch Vor- und Nachteile herauszuarbeiten, wird die Auswertung für unterschiedliche Optionen des Prozessrauschens σ durchgeführt. Analog zu Winiwarter et al. (2022a) werden die Werte 0,0002 m, 0,0005 m, 0,001 m, 0,002 m und 0,005 m miteinander verglichen. Zur Verifizierung der Ergebnisse im Allgemeinen wird zunächst ein Corepoint ausgewählt (1 in Abb. 6.31), der oberhalb der Erosionsrinnen im Fels liegt. Es wird erwartet, dass während des Beobachtungszeitraums keine Bewegungen stattfinden und dieser Bereich stabil ist.



(a) Übersichtsdarstellung aller Resultate.



(b) Detaillierte Darstellung der Resultate. Zoom von Abb. 6.32a.

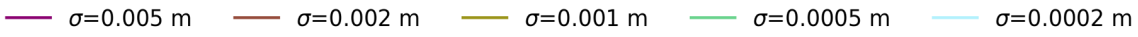


Abb. 6.32.: Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 1.

In Abbildung 6.32a ist analog zu den vorhergegangen Kapiteln der Zeitraum dargestellt, der in beige die Datenlücken zeigt sowie in grün (Erosion) und blau (Baustellenaktivität) die gesuchten geomorphologischen Prozesse. Es sind die Ergebnisse für die fünf verschiedenen Werte von σ zu sehen. Wie erwartet, sind bei kleinen Werten für σ die Trajektorien geglättet. Bei der Auswahl eines großen Wert für σ ist der hohe Freiheitsgrad erkennbar und das Modell folgt periodischen Abweichungen. Der Modellierung liegt eine Registrierung über die Prismen zugrunde (Kap. 5.3.3), sodass nicht von einem Registrierungsfehler auszugehen ist. Die Änderungen in den M3C2-EP-Distanzen werden entlang eines lokalen Normalenvektors dargestellt, der in diesem Fall in etwa parallel zur Sichtachse des Scanners zum Felsen liegt und damit Veränderungen in der

Streckenmessung des Laserscanners dominierend darstellt. Die Untersuchung dieses Resteffektes ist nicht mehr Teil dieser Arbeit. Außerdem sind anhand der gestrichelten Linien die Signifikanzniveaus erkennbar. Das Verhalten folgt den Beschreibungen aus Kapitel 6.2.1.1. Durch die niedrigere angenommene Korrelation bei hohen σ erhöht sich entsprechend das Signifikanzniveau. Darüber hinaus ist zu sehen, dass innerhalb der Datenlücken das Signifikanzniveau ebenfalls ansteigt. Abbildung 6.32b wird genutzt, um die Signifikanzniveaus als auch die Trajektorien deutlicher darzustellen. Neben den Datenlücken fällt auf, dass insbesondere an Tagen mit Regen (z.B. am 31.08.2021) das Signifikanzniveau kurzzeitig ansteigt.

Zwei weitere Corepoints werden im Bereich der Erosion und erwarteten Akkumulation von Material ausgewählt (2 und 3 in Abb. 6.31). Die zugrundeliegenden Prozesse der Erosion (Abb. 6.33) und Akkumulation (Abb. 6.34) sind jeweils im grünen Zeitfenster ersichtlich. Die Parametrisierung von σ hat jedoch erheblichen Einfluss auf die zeitliche Interpretation. Zu niedrig gewählte Werte führen zu einer Glättung, und Signifikanzgrenzen werden einige Tage vor dem eigentlichen Ereignis überschritten. Höhere σ sorgen für realistische Ergebnisse auf der Zeitskala, aber zusätzlich auch für erhöhte Signifikanzgrenzen, da der Filter eher den originalen Messwerten folgt.

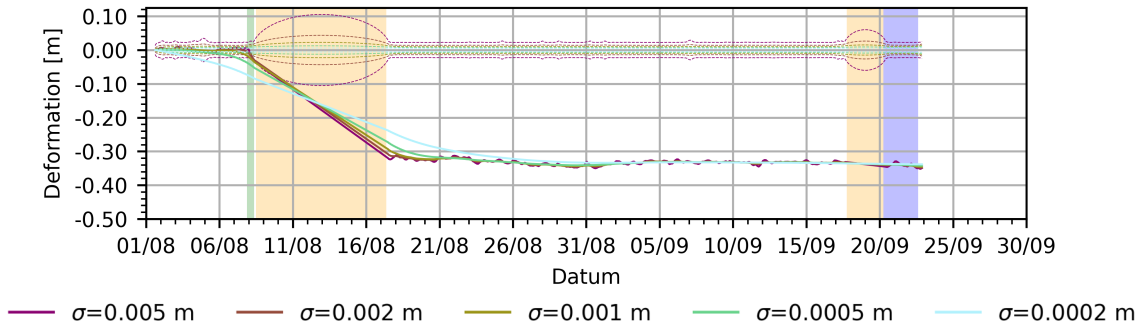


Abb. 6.33.: Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 2.

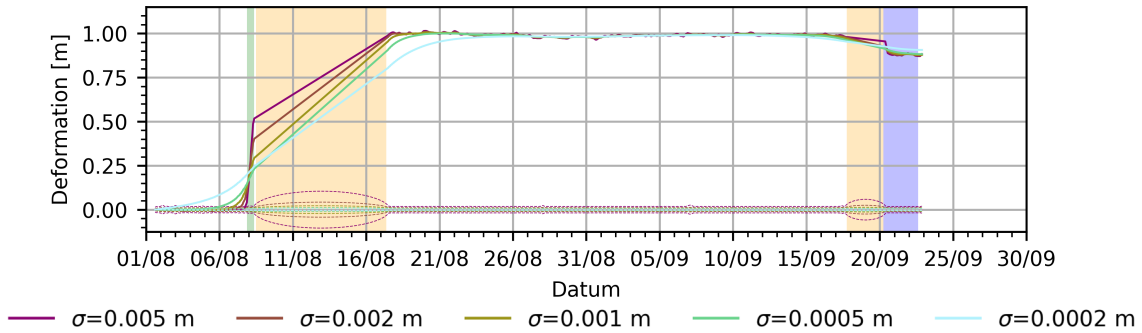


Abb. 6.34.: Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 3.

In Kapitel 6.1.2.2 Abbildung 6.17 deutet die Markierung a. auf eine frühere Aktivierung der Erosion, als sie zunächst zu Beginn dieses Kapitels angenommen wird. Die Auswahl von zwei weiteren Corepoints (4 und 5 in Abb. 6.31) stellt diesen Prozess

deutlich dar. Es ist zu erkennen, dass bereits in der Nacht vom 4. auf den 5. August eine erste Erosionsrinne mit zugehöriger Akkumulation unterhalb entsteht. Die Glättung der jeweiligen Trajektorien und das Verhalten der Signifikanzniveaus ist analog zu den vorherigen Betrachtungen.

Abschließend wird ein Corepoint aus dem Bereich der Baustellenaktivität ausgewählt (6 in Abb. 6.31). Das Ereignis ist innerhalb des blauen Zeitraums erkennbar. Eine Glättung der Trajektorie sorgt zeitlich zu früh für eine Überschreitung der Signifikanzgrenze. Außerdem wird die Magnitude der Distanzänderung zu niedrig geschätzt.

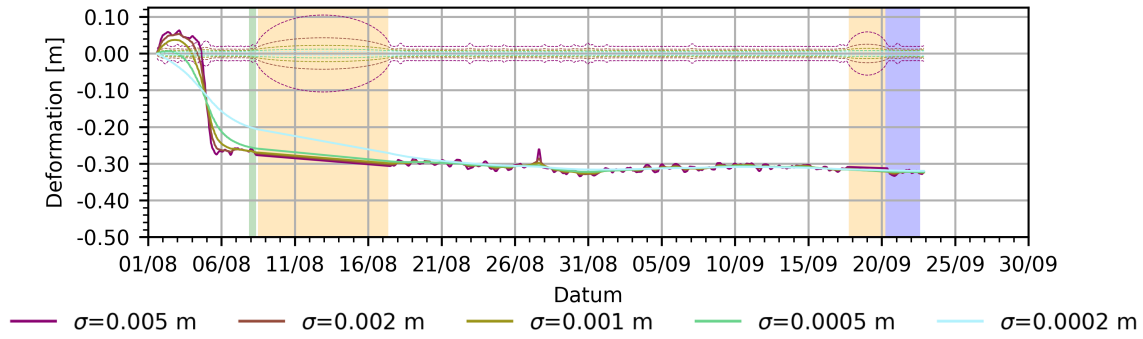


Abb. 6.35.: Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 4.

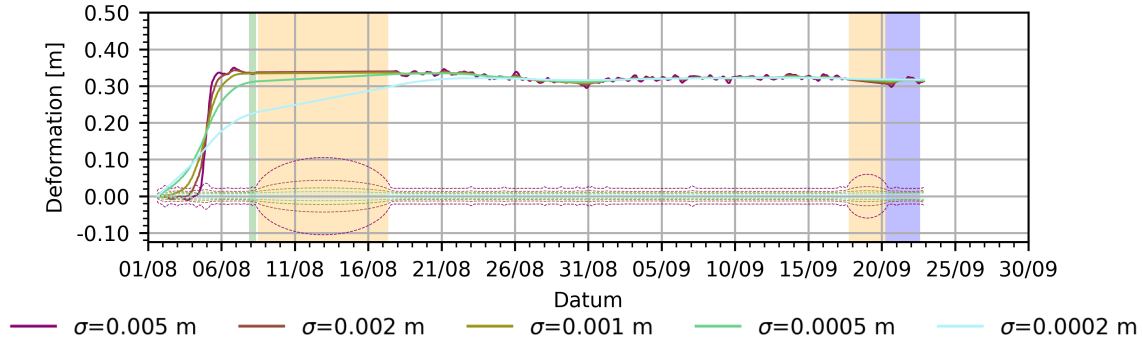


Abb. 6.36.: Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 5.

Grundsätzlich hat sich die Kalman-Filterung bspw. in verschiedenen Subdisziplinen der Geodäsie für die unterschiedlichsten Anwendungen als brauchbar herausgestellt. Im Zusammenhang dieser Arbeit lässt sich zunächst darstellen, dass räumlich als auch zeitlich hochauflösende Punktwolken automatisiert ausgewertet werden können und sich Zeitreihen automatisiert modellieren lassen. Die Kalman-Filterung ist für die Modellierung zeitlich diskreter Ereignisse wie z.B. Steinschlag, kurzzeitige Erosionen oder Baggerarbeiten, so wie sie in dieser Arbeit ausgewählt wurden, nicht geeignet, was auch anhand der hier vorliegenden Ergebnisse bestätigt wird. Brauchbare Ergebnisse werden nur dann erzielt, wenn σ hoch gewählt wird. Dadurch gehen aber die Vorteile (Glättung, Korrelation und das niedrige Signifikanzniveau) der Methode verloren. Es ist jedoch erkennbar, dass sich die Methode bei sich gleichmäßig, homogen verändernden Zuständen (bspw. ein Hangkriechen) als vorteilhaft herausstellt. Mittels der

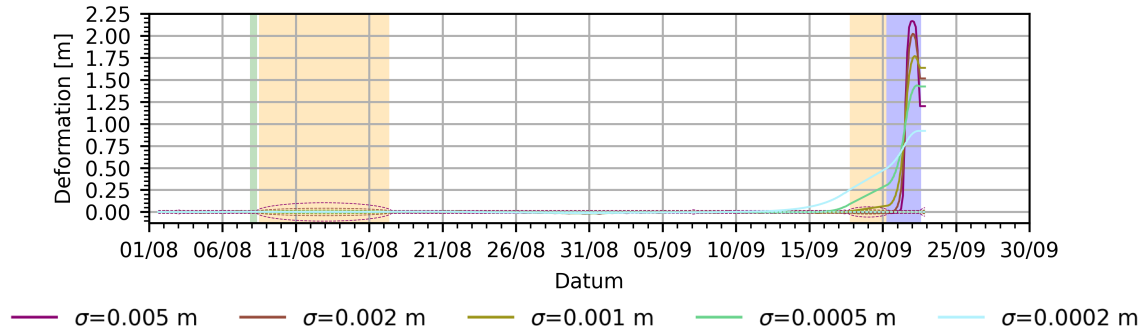


Abb. 6.37.: Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 6.

Modellierung über die Zeit - mit entsprechender Auswahl eines geeigneten σ - lassen sich niedrigere Signifikanzniveus erreichen und Veränderungen im Bereich geringer Magnitude sind bereits detektierbar. Die Methode liefert demnach Vorteile bei der Analyse langperiodischer Vorgänge an einem Überwachungsobjekt.

Diese Methode bietet ein weiteres Tool, um Scandaten aus permanenten Installationen, basierend auf einer statistischen Analyse der Daten, automatisiert auszuwerten. Es wird das Potential dargestellt, die Methode im Sinne eines adaptiven Monitorings in Kombination mit ergänzenden Analysetools einzusetzen.

6.2.2. 4D-Änderungsobjekte (4D-OBC)[2]

6.2.2.1. Methode

Die Extraktion von 4D-Änderungsobjekten (4D-OBC) ist eine Methode der raumzeitlichen Segmentierung in 3D-Zeitserien, basierend auf Laserscandaten, um Änderungen verschiedener räumlicher und zeitlicher Eigenschaften vollautomatisch zu analysieren (Anders et al., 2021). Dabei werden Änderungen zunächst in der Zeitserie detektiert und dann auf Basis ähnlicher Änderungsmustern in den Raum übertragen und dort abgegrenzt. Dies ergibt sogenannte 4D-Änderungsobjekte («4D objects-by-change»), die sich zeitlich und räumlich überlagern können, entsprechend verschiedener Oberflächenprozesse in der realen Welt. Gegenüber der einleitend in diesem Kapitel beschriebenen Restriktionen, dass grundsätzlich unbekannt ist, wann und wo Änderungen stattfinden oder Änderungen mit räumlicher Überschneidung vorkommen, ist die Methode hier effektiv einsetzbar.

Die raumzeitliche Segmentierung basiert auf der Datenstruktur eines gleichförmig dimensionierten Raum-Zeit-Arrays, was das zu beobachtende Objekt einschließt. Abgeleitet aus der Zeitserie der 3D-Punktwolken, enthält dieser Array die Oberflächenänderungen relativ zu einer globalen Referenzepoche für sogenannte Corepoints, die für die beobachtete Szene definiert werden. Somit enthält der Raum-Zeit-Array die Information über Änderungen in der Szene zu jedem Zeitpunkt in der Zeitserie. Gleichzeitig besteht Zugriff auf die 1D-Zeitserie an jedem Punkt in der Szene (also dem Corepoint). Als Punktwolke können die Corepoints grundsätzlich irregulär im Raum angeordnet sein. In dieser Arbeit wird für die Extraktion der 4D-Änderungsobjekte jedoch ein

[2]Unterkapitel basiert auf Czerwonka-Schröder et al. (2023).

reguläres Gitter an Corepoints herangezogen. Die räumliche Auflösung (Gitterweite) wird auf 0,5 m festgelegt. Die Distanzberechnungen pro Corepoint basieren hierbei auf einer Erweiterung des weitverbreiteten M3C2-Algorithmus (Lague et al., 2013) mit Fehlerfortpflanzung (Winiwarter et al., 2021). Die Parametrisierung für die M3C2-EP-Distanzen ist analog zum vorherigen Kapitel (6.2.1). Nach der Distanzberechnung für alle Epochen ist für jeden Corepoint eine Zeitserie von M3C2-EP-Distanzen vorhanden. Auf diese Zeitserien wird zur Reduktion des Messrauschens eine zeitliche Mittelung angewendet. Dem Ansatz von Kromer et al. (2015) folgend, wird der Änderungswert jeder Epoche auf den Medianwert eines gleitenden Zeitfensters mit einer Dauer von 24 Stunden gesetzt. Diese Filterung wird nur in der zeitlichen Domäne angewandt, da eine räumliche Aggregation bereits in der M3C2-Distanzberechnung enthalten ist. Die zeitlich gemittelten Änderungswerte im abgeleiteten Raum-Zeit-Array stellen den Input für die Extraktion von 4D-Änderungsobjekten.

Die raumzeitliche Segmentierung, also der Kern der Extraktion von 4D-OBC, wird durch «Region Growing» ausgehend von sogenannten Seeds durchgeführt. Diese Seeds basieren auf einer detektierten Zeitspanne an einem Corepoint, in der eine relevante Oberflächenaktivität detektiert wurde. Die Detektion dieser relevanten Oberflächenaktivität erfolgt durch lineare Regression (Anders et al., 2022b). Dabei werden Zeitspannen identifiziert, in denen Akkumulation oder Erosion stattfindet, also eine kontinuierliche Zu- oder Abnahme von Oberflächenmaterial (oder eine Verformung der Oberfläche selbst). Diese Identifizierung erfolgt durch stückweise lineare Regression, indem eine Gerade mittels kleinster Quadrate für Teile von Zeitserienwerten, die ähnliche numerische Gradienten aufweisen, eingepasst wird. Um dann zu bestimmen, ob es sich um eine relevante Änderung handelt, d.h., ob eine Änderungszeitspanne als Seed verwendet werden soll, ist ein Schwellenwert erforderlich, der die minimal detektierbare Änderung repräsentiert. Für die Präsentation der Methodik in dieser Arbeit wird ein statischer Wert von 0,05 m (Anders et al., 2022a) angenommen. Ein niedrigerer Wert würde zu einer höheren Anzahl an nicht signifikanten 4D-Änderungsobjekten führen. Tatsächliche Oberflächenänderungen mit Magnituden unter 0,05 m können demnach nicht detektiert werden.

Die Detektion von Oberflächenänderungen wird für alle Corepoints durchgeführt. An jedem Corepoint können keine, eine oder mehrere Zeitspannen von Oberflächenaktivitäten als Seedkandidaten detektiert werden. Im Anschluss an die Seeddetektion werden 4D-Änderungsobjekte durch Region Growing räumlich abgegrenzt. Dabei wird die Zeitspanne eines 4D-Änderungsobjekts genau durch den Start- und Endzeitpunkt einer im Seed detektierten Oberflächenaktivität abgegrenzt. Seeds aus der Liste von Seedkandidaten werden für Region Growing verwendet, wenn sie nicht bereits in ein voriges 4D-Änderungsobjekt segmentiert wurden (d.h., es besteht sowohl zeitliche als auch räumliche Überlappung). Als Homogenitätskriterium für das Region Growing wird die Ähnlichkeit der Oberflächenänderungen in der Seed-Zeitspanne, die als Inverse der Dynamic Time Warping (DTW) Distanz (Berndt & Clifford, 1994) abgeleitet wird, verwendet. Der Schwellenwert für die Segmentierung wird für jedes 4D-Änderungsobjekt automatisch bestimmt, basierend auf dem Ergebnis mehrerer parallel berechneter Segmentvarianten für verschiedene verwendete Schwellenwerte (in dieser Studie 0,5 bis 0,9 nach Anders et al. (2022a)). Dies folgt dem Ziel, das Objektausmaß zu maximieren, aber gleichzeitig eine starke Überschätzung der Fläche zu vermeiden. Letzteres passiert, sobald der Schwellenwert für das jeweilige 4D-Änderungsobjekt so niedrig wird, dass

eine große Fläche außerhalb des strikteren Objektausmaßes hinzugefügt wird. Details zur Methode der raumzeitlichen Segmentierung sind in Anders et al. (2021) präsentiert. Das Ergebnis ergibt eine Sammlung von 4D-Änderungsobjekten, die Oberflächenaktivitäten in der Szene der 3D-Zeitserie beschreiben.

6.2.2.2. Resultate

Die besondere Stärke dieser raumzeitlichen Segmentierung ist, dass Oberflächenaktivitäten in der Szene individuell identifiziert und raumzeitlich abgegrenzt werden. So kann es - wie bei Oberflächenprozessen in der realen Welt - vorkommen, dass sich 4D-Änderungsobjekte räumlich und/oder zeitlich überlappen. Die höhere Berechnungskomplexität der Methode wiederum kann durch Eingrenzung der räumlichen (und ggf. auch zeitlichen) Abdeckung der PLS-Daten reduziert werden. Aus diesem Grund wird der limitierte Bereich als Ergebnis der Clustermethoden (Kap. 6.1) verwendet. Entsprechend der Parametrisierung aus Kap. 6.2.1.2 (Tab. 6.9) werden für 73.433 Corepoints Zeitreihen bereitgestellt. An 13.687 Locations werden in Summe 61.023 Änderungen detektiert, aus denen im weiteren Verlauf 67 Änderungsobjekte extrahiert werden. Eine visuelle Inspektion der räumlichen Anordnung zeigt (blaue Objekte in Abb. 6.38), dass sich die 4D-Änderungsobjekte vor allem auf den Bereich der Baustellenaktivität (Rote Markierung in Abb. 6.38) konzentrieren. Einige Objekte wurden im Bereich der Erosionsrinnen als Abtragungs- und Ablagerungsbereiche (Grüne Markierung in Abb. 6.38) identifiziert. Die Erosionsrinnen im Hangbereich werden von den 4D-Änderungsobjekten nicht vollständig abgedeckt. Bei der vorgestellten Fallstudie liegt das daran, dass die Materialabtragung auch innerhalb der Rinne recht homogen durch verschiedene Magnituden von Abtragung und Anlagerung in den Zeitserien manifestiert ist. Daher wird eine Vielzahl kleinerer Objekte extrahiert (teilweise sichtbar in Abb. 6.38). Ein Großteil der Segmente im Bereich der Rinne wird aufgrund des Minimumgrößenkriteriums nicht als 4D-Änderungsobjekt identifiziert. Eine Anpassung der Parametrisierung zur Analyse der Erosionsrinnen ist möglich. Ausschlaggebend ist hierbei die Anforderung der Stakeholder und inwieweit die gesuchten Prozesse vor der Analyse beschrieben werden können.

Besonders interessant für die Prozessanalyse ist die Eigenschaft der 4D-Änderungsobjekte, dass räumlich überlappende Oberflächenaktivitäten individuell als zeitlich aufgetrennte Objekte identifiziert werden. Um das Potential darzustellen, wurden sechs Objekte ausgewählt, die teilweise überlappen. Die Objekte 1 bis 6 werden in Abbildung 6.38 nochmal detailliert dargestellt. Die Einfärbung ist nach dem Grad der Zeitreihenähnlichkeit durchgeführt.

Mittels der ausgewählten Objekte lassen sich unterschiedliche Phasen der Materialablagerung und -abtragung auf Basis verschiedener Prozesse darstellen. Objekt 1 und 2 zeigen die erste Erosion und Akkumulation in der Nacht vom 04. auf den 05.08.2021, gefolgt von einer weiteren Erosion (Objekt 3) und der Materialakkumulation am Ende der Rinne (Objekt 4) in der Nacht vom 07. auf den 08.08.2021. Zum Ende der Beobachtungsperiode lässt sich klar darstellen, dass mittels Baggerarbeiten das akkumulierte Material (Objekt 5) an anderer Stelle zusammengetragen wird (Objekt 6). Die Analyse dieser 4D-Änderungsobjekte ermöglicht es, Änderungsprozesse räumlich und zeitlich aufzutrennen, sodass verschiedene Prozesse und auch einzelne Phasen (z.B. von Baustellenaktivität) vollautomatisch raumzeitlich abgegrenzt werden. Die zugrundeliegende raumzeitliche Segmentierung erfordert eine höhere Prozessierungszeit, kann aber

durch den ersten Schritt des Zeitserien-Clusterings mit einer räumlichen Eingrenzung der relevanten Bereiche effizient durchgeführt werden.

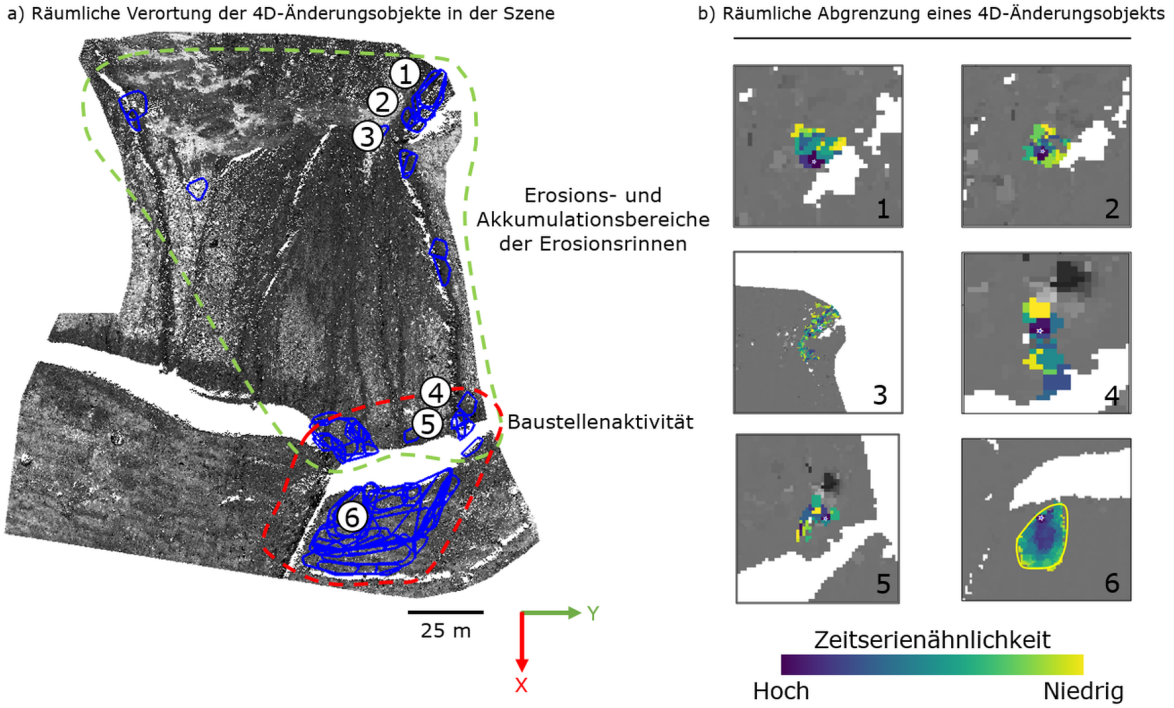


Abb. 6.38.: Räumliche Übersicht der detektierten 4D-Änderungsobjekte (blau) und die Darstellung von sechs exemplarisch ausgewählten Objekten mit entsprechender räumlicher Abgrenzung.

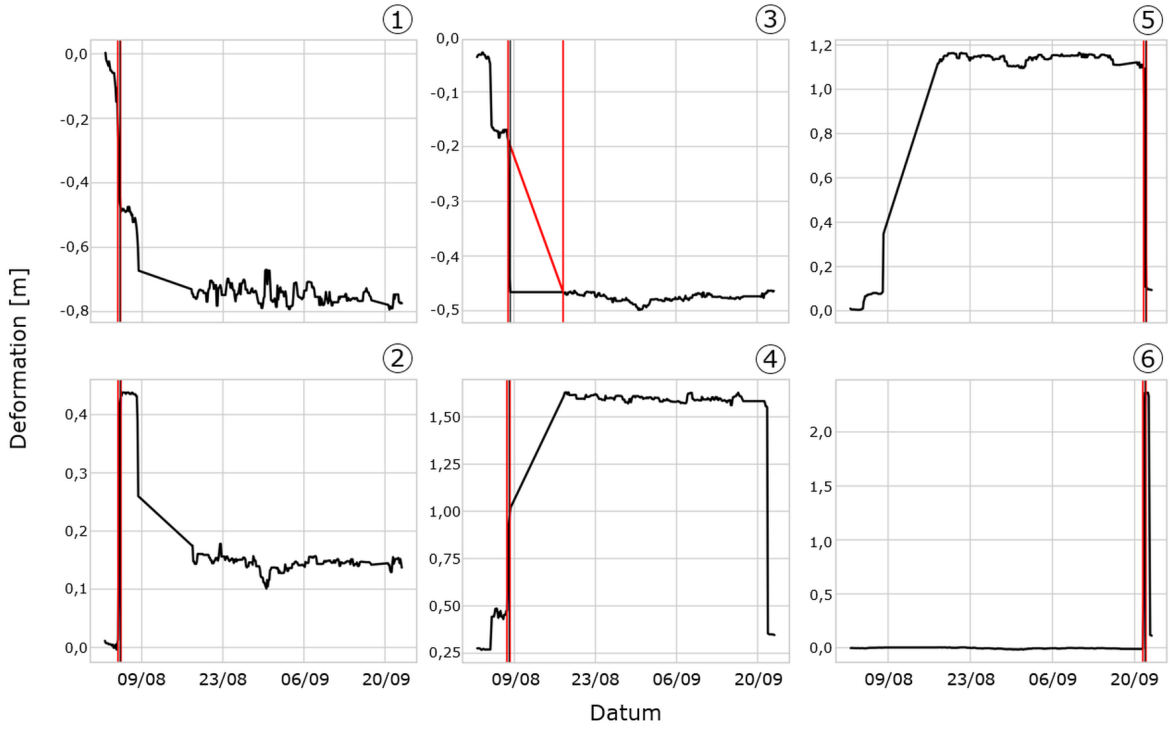


Abb. 6.39.: Zusammenfassung der Zeitreihen von sechs ausgewählten 4D-Änderungsobjekte. Zeitreihe bezogen auf den Seed.

6.2.3. Zusammenfassung und Diskussion

Ziel von Kapitel 6 ist es, eine konzeptionelle Studie zur automatisierten Informationsextraktion von PLS-Daten im Zuge einer echtzeitnahen, webbasierten Assistenz vorzustellen. Kern der Studie ist es, einen Automatismus zu präsentieren, der mit minimalem Vorwissen der Anwender zum Bewegungsverhalten eines zu überwachenden Objekts auskommt. Ergebnis dieser Studie ist eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Verfahren und keine qualitative Bewertung anhand auszuwählender Kennzahlen. Demnach kann ein anderer Anwender während des aktuellen Status der methodischen Entwicklung dieser Methode zu unterschiedlichen Resultaten kommen.

Es wird ein mehrstufiger Arbeitsablauf gezeigt, der im ersten Schritt eine rasterbasierte Repräsentation der Punktwolke mittels k-Means oder eine merkmalsbasierte Zeitreihensegmentierung unter Hinzunahme eines Gaußschen Mischmodells (GMM) durchführt. Für beide Methoden kann eine halbautomatische Analyse aufgezeigt werden. Bei k-Means wird gezeigt, dass eine hohe Komplexität unterschiedlicher Prozesse in der Datengrundlage (hier die Streckenänderung) für den Algorithmus von Nachteil ist. Außerdem ist ersichtlich, dass Ausreißer in den Zeitreihen zu fehlerhaften Segmentierungen führen und der Algorithmus von allen Zeitreihen eine gleiche Länge der jeweiligen Arrays sowie gleiche Intervalle verlangt. Zudem handelt es sich um ein geometrisches Clustering, bei dem Distanzen zwischen den Zeitreihen minimiert werden, sodass eine identische Maßeinheit als auch Skalierung notwendig ist. Nachdem die Komplexität der Szene durch die Eingrenzung des zu analysierenden Bereichs reduziert wurde, konnte das Potential des Verfahrens dargestellt werden. Die k-Means Methodik ist eine einfach zu parametrisierende Algorithmik, die bereits nach kurzer Zeit automatisch sinnvolle Segmentierungen aus den PLS-Daten liefert, die sich eindeutig geomorphologischen Prozessen zuordnen lassen. Bei größer werdenden Zeitreihen kann die Anwendung von k-Means jedoch sehr rechenintensiv sein. Eine Alternative ist im merkmalsbasierten Clustering mittels GMM zu finden. Hierbei werden stets 794 definierte Merkmale aus jeder Zeitreihe - unabhängig von der Länge - extrahiert. In der vorgestellten Studie wird mittels dieses Verfahrens der Merkmalsraum jedoch erweitert. Statt 318 Streckenänderungen werden 794 Merkmale verwendet. Sobald aber mehrere tausend Datenpunkte je Zeitreihe vorhanden sind, bleibt die Anzahl der Merkmale weiterhin konstant, was als wesentlicher Vorteil dieser Methode anzusehen ist. Ein zusätzliches Potential der Methode besteht darin, das sie mit Datenlücken, zeitlichen Offsets und Ausreißern zurechtkommt. In der Praxis kommt das Clustering des Weiteren mit Zeitreihen unterschiedlicher Länge und Intervallen aus. Die Datengrundlage ist bei beiden Verfahren identisch. Es ändert sich lediglich die Repräsentation der Daten. Bei der Anwendung beider Algorithmen wird klar, dass die Streckenänderung alleine nicht ausreicht, die Vielzahl an individuellen Prozessen in der vollumfänglichen Szene zu beschreiben. Die Amplituden der Änderungen, vor allem in den Bereichen mit Baumwuchs, sind teilweise sehr hoch und führen zu einer Übersegmentierung der Modelle. Keine klare Struktur beim AIC und BIC deuten darauf, dass mehr Parameter bestimmt werden sollen, als die Daten tatsächlich hergeben. Die deskriptiven Betrachtungen der Ergebnisse dieser Studie zeigen dennoch das Potential innerhalb einer Monitoringanwendung auf.

Aus der vorliegenden Arbeit entstehen unmittelbar drei Handlungsfelder. Zum einen sollte bei zukünftigen Untersuchungen der Fokus auf der Beschreibung der Parametrisierung der Algorithmik liegen, und insbesondere die extrahierten Features beim

merkmalsbasierten Clustering müssen hinsichtlich ihrer Signifikanz in den entsprechenden Modellen besser verstanden werden, sodass klar wird, welche Prozesse mit ihnen beschrieben werden. Zum anderen ist das Verhalten der Auswerteverfahren bei lang andauernden Zeitreihen, die über wenige hundert Scandaten hinausgehen, zu untersuchen. Schlussendlich ist zu verifizieren, ob die Datengrundlage gezielt über die Streckenänderung an sich erweitert wird oder bspw. geometrische Informationen von benachbarten Pixeln in Form von Filtern mit in eine Segmentierung einfließen sollten. Zusätzlich besteht das Potential zur Implementierung eigener Features. Sind diese Handlungsfelder verstanden, sind vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für diese Methode denkbar. So ist eine weitere Automatisierung im Kontext künstlicher Intelligenz oder aber auch die Anwendung in Bezug zur Registrierung multitemporaler Punktwolken möglich, da schon jetzt stabile Bereiche segmentiert werden können.

Auf die Segmentierung der Szene folgend und der daraus abgeleiteten Auswahl eines räumlich eingegrenzten Bereichs werden in einem zweiten Schritt die Analysemethoden «M3C2-EP mit adaptierter Kalman-Filterung» und «4D-OBC» angewendet. Beide Verfahren fügen sich in die zuvor genannten Erkenntnisse ein und zeigen ein enormes Potential in der automatisierten Anwendung. In Kapitel 6.2.1.2 wird bereits zusammengefasst, dass die Kalman-Filterung im vorliegenden Anwendungsbeispiel zwar nachvollziehbare Ergebnisse liefert, obwohl die Stärken dieses Verfahrens bei der Analyse sich gleichmäßig homogen verändernder Objekte zu sehen sind. Die Analyse von 4D-Änderungsobjekten zeigt ihre Leistungsfähigkeit bei der raumzeitlichen Segmentierung und demonstriert die automatisierte Detektion zeitlich als auch räumlich überlappender Änderungsobjekte.

Mit Kapitel 6 wird anhand einer konzeptionellen Studie eine Toolbox vorgestellt, die es ermöglicht, enorme Datenmengen eines PLS automatisiert auszuwerten. Die unterschiedlichen Zielsetzungen der jeweiligen Algorithmen erlauben eine kooperative Anwendung innerhalb eines echtzeitnahen Assistenzsystems, um verschiedenen Stakeholdern relevante Informationen adäquat bereitstellen zu können. Die in diesem Kapitel beschriebenen Vor- und Nachteile sind in Tabelle 6.10 zusammengefasst.

Tab. 6.10.: Vor- und Nachteile der eingesetzten Methoden zur Informationsextraktion aus multitemporalen Punktwolken.

Methode	Vorteile	Nachteile
k-Means (Kap. 6.1.2)	• Einfach zu parametrisieren. • Automatisierbar und leicht zu implementieren.	• Nicht robust bei komplexen Szenen. • Nicht robust ggü. Messfehlern. • Zeitreihen müssen identisch sein (Länge, Datenlücken, Intervalle). • Keine räumliche Betrachtung.
GMM (Kap. 6.1.3)	• Einfach zu parametrisieren. • Automatisierbar und leicht zu implementieren. • Merkmalsbasiertes Clustering statt sequentieller Daten. • Zeitreihen müssen nicht identisch sein (Länge, Datenlücken, Intervalle) • Implementierung eigener Features.	• Nicht robust bei komplexen Szenen. • Keine räumliche Betrachtung.
M3C2-EP + Kalman-Filterung (Kap. 6.2.1)	• Räumliche Nachbarschaft wird berücksichtigt. • Basiert auf Bewegungsmodell. • Gute Resultate bei gleichmäßigen, homogenen Bewegungsprozessen. • Statistische Analyse der Zeitreihen.	• Nicht geeignet bei zeitlich diskreten Ereignissen. • Hoher Rechenaufwand. • Parametrisierung benötigt Erfahrung des Anwenders.
4D-OBC (Kap. 6.2.2)	• Räumliche Nachbarschaft wird berücksichtigt. • Detektion räumlicher und/oder zeitlich überlappender Änderungsobjekte. • Zeitlich diskrete Ereignisse sind eindeutig detektierbar.	• Hoher Rechenaufwand. • Parametrisierung benötigt Erfahrung des Anwenders.

7. Fazit und Ausblick

Der Paradigmenwechsel in der Ingenieurgeodäsie dauert an und der technische Fortschritt in immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen ermöglicht den Einsatz von Messtechnik in verschiedenen Anwendungen, die bis vor wenigen Jahren undenkbar waren. Die Datenerfassung flächenhafter Punktwolken stellt heutzutage nicht mehr den limitierenden Faktor dar und der Übergang zu permanentem TLS (PLS) ermöglicht zeitlich als auch räumlich die nahezu kontinuierliche Vermessung von zu überwachenden Objekten. Einleitend wird beschrieben, dass Naturkatastrophen weltweit unter dem Einfluss des Klimawandels tendenziell zunehmen (Kap. 1). Dabei führen insbesondere gravitative Massenbewegungen zu Schäden in Milliardenhöhe. Damit gezielt Maßnahmen zur Prävention von Naturgefahren ergriffen werden können und ein Schutz kritischer Infrastruktur sowie der Bevölkerung möglich ist, ist eine Analyse der zugrundeliegenden geomorphologischen Prozesse notwendig. Daraus ableitend steigt der Bedarf an qualitativ hochwertigen drei- bzw. vierdimensionalen Datensätzen der Erdoberfläche. PLS kann den Bedarf an solchen Datensätzen decken und ist in der Lage, als webbasierte Echtzeitassistenz unmittelbar in ein ganzheitliches Risikomanagement integriert zu werden. Neben den Vorteilen eines PLS bedeutet der Paradigmenwechsel die Adaption bereits bekannter Denkweisen und Auswertemethoden an die neuen technischen Möglichkeiten. Diese Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, dass PLS als Begriff messtechnisch als auch methodisch systematisiert ausgearbeitet wird. Potentielle Anwender erhalten mit Hilfe dieser Arbeit ein besseres Verständnis zu den einzelnen Prozessschritten und den jeweiligen beeinflussenden Faktoren. Drei übergeordnete Handlungsfelder werden in dieser Arbeit thematisiert.

1. Zunächst befasst sich die Arbeit mit der Qualitätssicherung von Messwerten. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf den Einflüssen der Atmosphäre und des Registrierungsprozesses auf die Messergebnisse. Durch eine fachgerechte Berücksichtigung sollen Missinterpretationen der Ergebnisse aufgrund fehlerhafter Signifikanzniveaus oder systematischer Messabweichungen minimiert werden **(Untersuchungsziel 1 und 2)**.
2. Dieses Handlungsfeld entsteht aus der Forderung heraus, dass im Zuge eines integrativen Monitorings möglichst aktuelle Informationen zur Steuerung von Prozessen zur Verfügung stehen müssen. Die Datenanalyse erfolgt mittels der Transformation multitemporaler Datensätze hin zu relevanten Informationen. Kritisch ist, dass je nach Dauer einer permanenten Installation die Anzahl der Datensätze in die Tausende gehen kann. Deshalb stellt diese Arbeit ein Konzept vor, mit dessen Hilfe sich automatisiert und echtzeitnah Informationen extrahieren lassen **(Untersuchungsziel 3)**.
3. Zuletzt befasst sich die Arbeit mit der strukturierten Darstellung der kompletten Prozesskette von der Messwerterfassung bis hin zur Visualisierung und dem Reporting der Ergebnisse. PLS wird als ganzheitliches System mit Hilfe eines strukturierten Workflows zusammenfassend dargestellt **(Untersuchungsziel 4)**.

In Kapitel 4 wird basierend auf PLS ein Konzept für ein Echtzeitassistenzsystems vorgestellt. Der Entwurf wird in Anlehnung an die internationale Norm ISO 31000:2018 entwickelt und lehnt sich zusätzlich an die Qualitätsmerkmale für Informationen nach Wiltschko (2004) an. Die Datenerfassung, das Datenmanagement, die Datenanalyse sowie schlussendlich die Visualisierung und das Reporting werden als vier separate Kernthemen herausgearbeitet. Im Sinne des vierten Untersuchungsziels wird mit dieser Arbeit ein belastbarer als auch transparenter Workflow zur Implementierung von PLS in einem webbasierten Echtzeitassistenzsystem vorgestellt, der auf entsprechender Normung und allgemein anerkannter Grundsätze aufbaut.

Im Sinne der Qualitätssicherung wurden drei Fallstudien bearbeitet. Fallstudie I (Kap. 5.1) hat im Frühjahr 2020 in Noordwijk / Niederlande stattgefunden. Die Studie zeigt in Abhängigkeit von zwei Sturmereignissen, dass eine permanente Installation eines Laserscanners nicht an sich als stabil angenommen werden darf. Mittels zusätzlicher Neigungssensorik lassen sich hochfrequente Bewegungen am Scanner als Auswirkung auf die Datenqualität der Punktwolken detektieren und mit den extremen Wetterereignissen in Verbindung setzen. Ab Windgeschwindigkeiten von 10 m/s und mehr nehmen die Standardabweichungen der Neigungswerte zu und die Datenqualität in der Punktwolke sinkt. Hinzukommen niederfrequente Anteile in den Bewegungen des Scanners, die sich jedoch mittels Starrkörpertransformation korrigieren lassen. GNSS-Sensoren an einem Schiffscontainer validieren die Erkenntnisse.

Fallstudie II (Kap. 5.2) präsentiert die Möglichkeit zur Detektion von Corner Cube Prismen mittels eines Laserscanners. Das bietet den Vorteil, eindeutig identifizierbare Messpunkte in den Punktwolkendaten zu nutzen. Innerhalb dieser Studie wird ein Konzept vorgestellt, das eine Systemüberprüfung hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit in Längs- und Querrichtung ermöglicht. Es wird gezeigt, dass die Prismendetektion für tiefergehende Analysen im Long Range Bereich praktikabel ist und ein sinnvolles Feature darstellt. Genauigkeiten der Längsabweichung zeigen vergleichbare Werte zu einer tachymetrischen Streckenmessung. Die Querkomponente ist in dieser Studie um einen Faktor von etwa 14 schlechter als die Streckenmessung.

Als Kern dieser Arbeit wird ein Datensatz aus dem Valsertal (Tirol) / Österreich genutzt. In der Fallstudie III (Kap. 5.3) wurden zunächst Einflüsse der atmosphärischen Refraktion auf die Messergebnisse eines PLS untersucht. Systematische Effekte in den Messdaten an sich können unterschiedliche Ursachen haben. In Vals trat neben den atmosphärischen Einflüssen eine Pfeilerbewegung auf, deren Auswirkung auf die Messdaten in einem ersten Schritt extrahiert wurde. Abhängig von den aktuellen Wetterdaten, der Tageszeit, aber auch der atmosphärischen Schichtung sowie der Topographie wurden systematische Abweichungen in den Zenitwinkelmessungen auf ausgewählten Prismen nachgewiesen, die ihre Ursache in der raumzeitlichen Variation der mikroklimatischen Bedingungen im Valsertal haben. Visuren in geringen Höhen über dem Boden und entlang von Böschungskanten sind aufgrund erhöhter thermischer Aktivität zu vermeiden. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern wertvolle Hinweise dazu, was bei der Konzeption eines Überwachungssystems und der Standortwahl einer Messstation zu beachten ist.

Analog zur Fallstudie I wird auch in Fallstudie III gezeigt, dass trotz der Installation des Laserscanners auf einem Messpfeiler keine Stabilität angenommen werden darf. Die Messungen einzelner Messepochen sind für weitergehende Datenanalysen in einen gemeinsamen Koordinatenrahmen zu übertragen. Es wird gezeigt, dass bei unzureichen-

der Berücksichtigung einer Registrierung systematische Abweichungen auftreten, die zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen können. Die Herausforderungen besteht in der automatischen Detektion von stabilen Bereichen in den Punktwolken, sodass diese Bereiche zur Berechnung der Transformationsparameter verwendet werden können. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse eines Transformationsansatzes mittels detektierter Glasprismen und eines mittels datenbasierter Methode ohne die Auswahl stabiler Bereiche verdeutlicht diesen Umstand. Die Erkenntnisse aus den drei Fallstudien helfen dabei, im Sinne des GUM – TYP B (Kap. 2.2.3) fundierte Kenntnisse und Erfahrungen über den Messprozess zu erhalten und in zukünftigen Arbeiten und Entwicklungen als Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Durch die hochfrequente Datenerfassung mittels PLS über vergleichsweise lange Zeiträume entstehen Datensätze, die aus bis zu mehreren hundert Punktwolken bestehen können. Kapitel 6 fußt auf der Herausforderung, diese Datensätze möglichst automatisiert zu analysieren. In dieser Arbeit wird eine konzeptionelle Studie zur automatisierten Informationsextraktion von PLS-Daten im Zuge einer webbasierten Echtzeitassistenz vorgestellt. Das Ergebnis ist eine Toolbox mit verschiedenen Verfahren, die es ermöglicht, enorme Datenmengen eines PLS automatisiert und echtzeitnah auszuwerten. Es wird ein zweistufiger Prozess präsentiert, der in einem ersten Schritt die komplette Messszene nach unterschiedlichen Bewegungsprozessen segmentiert und somit räumliche Bereiche eingrenzt, in denen überhaupt erst eine tiefergehende Analyse Sinn macht. Um die Echtzeitfähigkeit nicht zu gefährden, wird ein komprimiertes rasterbasiertes Datenformat der Punktwolke verwendet. Auf Basis der Rasterdaten wird zum einen ein k-Means-Algorithmus und zum anderen eine merkmalsbasierte Zeitreihensegmentierung unter Hinzunahme eines Gaußschen Mischmodells durchgeführt. Die Datengrundlage ist bei beiden Verfahren identisch. Für jede Rasterzelle werden Zeitreihen, bestehend aus Streckenänderungen gegenüber einer Referenzepoche, gebildet und miteinander verglichen. Bei der Anwendung beider Verfahren wird gezeigt, dass aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen Prozesse innerhalb der Szene im Valsertal die Streckenänderung alleine nicht ausreicht, eine eindeutige Differenzierung zwischen den einzelnen Segmenten zu erhalten. Trotzdem wird das Potential der beiden Segmentierungsmethoden für eine automatisierte Monitoringanwendung nachgewiesen. Die Segmente können abschließend manuell geomorphologischen Prozessen zugeordnet und klassifiziert werden.

In einem zweiten Schritt werden in den räumlich relevanten Bereichen die Analysemethoden «M3C2-EP mit adaptierter Kalman-Filterung» und «4D-OBC» angewendet. Beide Verfahren zeigten im Vorfeld dieser Arbeit ein hohes Potential zur automatisierten Anwendung. Als nachteilig konnte allerdings die Anwendung auf der vollumfänglichen Punktwolke betrachtet werden, sodass mit der vorweggenommenen Segmentierung innerhalb dieser Arbeit eine Optimierung der Berechnungszeiten erfolgt. Bei der Methodik «M3C2-EP mit adaptierter Kalman-Filterung» liegen die Stärken bei der Analyse sich langsam und homogen verändernder Objekte. «4D-OBC» dagegen hat seine Stärken in der automatisierten Detektion sich zeitlich als auch räumlich überlappender Änderungsobjekte und somit auch bei plötzlich auftretenden Veränderungen. Die in dieser Arbeit konzipierte Methode wird auf einen Teil des Datensatzes im Valsertal angewendet und zeigt im Vergleich zu vorher ausgewählten Referenzdaten die erfolgreiche Umsetzung.

Die vorliegende Arbeit beweist ein hohes Potential zum Einsatz von PLS im Zuge eines Echtzeitassistenzsystems. Die Arbeit hilft den unterschiedlichen Anwendern dabei, den Workflow eines PLS von der Datenerfassung hin zur Informationsextraktion und abschließend der Visualisierung als auch des Reportings der Ergebnisse besser verstehen zu können. Der Prozess wird transparent dargelegt und macht es möglich, beeinflussende Parameter im Sinne des GUM einordnen zu können. In verschiedenen Anwendungsszenarien wurde gezeigt, dass mittels PLS eine qualitative sowie quantitative Beschreibung der zugrundeliegenden oberflächenverändernden Prozesse erzielt werden kann. Die Untersuchungsziele sind erreicht und die Erkenntnisse aus dieser Arbeit lassen die folgenden Schlüsse zu:

- Mithilfe der Beschreibung eines ganzheitlichen Workflows erhalten potentielle Anwender erstmals einen strukturierten Überblick zur Thematik.
- Glasprismen lassen sich nachweislich mittels Laserscanner detektieren und eine Genauigkeitsanalyse wurde durchgeführt.
- In Abhängigkeit des Wetters, der Tageszeit, aber auch der atmosphärischen Schichtung sowie der Topographie kann im Valsertal an Hochsommertagen vertikale Refraktion in den Scandaten nachgewiesen werden.
- PLS sind trotz ihrer scheinbar stabilen physischen Installationen auf Messpfeilern oder Konsolen nicht stabil. Die Installationen unterliegen täglichen Schwankungen, bedingt durch verschiedene äußere Einflüsse.
- Niederfrequente Bewegungen des Scanners, deren Periode größer ist als die Datenerfassungsdauer eines einzelnen Scans, können mit Hilfe von Starrkörpertransformationen korrigiert werden.
- Hochfrequente Bewegungsmuster, die die einzelnen Messlinien eines Scans beeinflussen, können im Zuge dieser Arbeit beschrieben werden, lassen sich jedoch nicht korrigieren.
- Bei der Anwendung von datenbasierten Registrierungsmethoden sind in einem weiteren Schritt stabile Bereiche in den jeweiligen Scandaten zu selektieren. Ohne eine Filterung kommt es zu systematischen Abweichungen in den berechneten Scanpositionen, die wiederum zu Fehlinterpretationen bei der Datenanalyse führt.
- Es wird eine Toolbox präsentiert, mit deren Hilfe innerhalb eines zweistufigen Verfahrens relevante Informationen automatisiert aus einem multitemporalen Datensatz extrahiert werden können.
- Auf der Grundlage von komprimierten Datenformaten konnten mithilfe von unüberwachtem maschinellem Lernen automatisch Informationen extrahiert werden. Es ermöglicht die Anwendung rechenintensiver Methoden direkt in den Bereichen, in denen Oberflächenveränderungen klassifiziert werden, anstatt den gesamten Datensatz zu verwenden. Dieser Ansatz ist einfach und hat ein hohes Potenzial für die halbautomatische Analyse in zukünftigen Anwendungen von PLS-Daten.

Abschließend werden offene Fragestellungen und Entwicklungspotentiale aufgezeigt. Kapitel 2.2.4 zeigt, dass es im Bereich von Gesetzen, Normen und Merkblättern einige Hinweise zur Anwendung von Überwachungsmessungen in verschiedenen Kontexten gibt. TLS wird explizit erst auf Ebene der Merkblätter erwähnt. In den Empfehlungen des Arbeitskreises «Geomesstechnik» (DGGT & DVW, 2022) wird PLS zwar erwähnt, es wird jedoch beschrieben, dass kontinuierlich messende TLS zwar technisch möglich sind, aber aufgrund der hohen Gerätekosten, der anfallenden Datenmengen und des daraus resultierenden Auswerteaufwands bisher keine Vorteile gegenüber anderen Verfahren haben. Diese Doktorarbeit widerlegt diese Aussage, sodass angestrebt wird, PLS zukünftig in die Empfehlung aufzunehmen.

Hinsichtlich der Datenerfassung sind Methoden zur Registrierung multitemporaler Punktwolken weiterzuentwickeln. Ansätze von Friedli und Wieser (2016), Wujanz et al. (2018a) und Y. Yang und Schwieger (2022) zeigen ein hohes Potential zur Adaption auf multitemporale Datensätze. Allerdings ist die Anwendung in Gebieten mit einem hohen Anteil an Vegetation in Form von Sträuchern und Bäumen bisher nicht vollzogen. Aus heutiger Sicht ist die Kombination von Registrierungsmethoden mit weiteren Methoden, die eine Klassifizierung der Punktwolkendaten ermöglichen, anzustreben.

Die geodätische Refraktion lässt sich in den Messdaten weiterhin nur begrenzt korrigieren. Die Fähigkeit, Prismen innerhalb eines Scans detektieren zu können, eröffnet neue Möglichkeiten zur Untersuchung potentieller Korrekturmodelle. Es wird beispielsweise vermutet, dass die messtechnische Erfassung eines Prismas mit mehreren zehntausend Messungen innerhalb kürzester Zeit die Möglichkeit bietet, turbulente Anteile in der Atmosphäre zu detektieren. Der vorhandene Datensatz bietet die Chance einer Konzeptstudie.

Das größte Potential für die weitere Entwicklung bietet der Bereich der Datenanalyse. Nachdem die Anwendung von Segmentierungsmethoden erfolgreich nachgewiesen wurde, geht es in den kommenden Schritten darum, die Parametrisierung der Algorithmen besser zu verstehen. Insbesondere beim merkmalsbasierten Clustering mittels GMM, bei dem eine statistische Methode zugrunde liegt, lassen sich die Parameter statistisch bewerten. Es wird vermutet, dass so ein detailliertes Verständnis zu den beeinflussenden Faktoren der Segmentierung erlangt werden kann und dann gezielt weitere Differenzierungsmerkmale innerhalb einer Messszene eingeführt werden können. Zusätzliche Beschreibungen werden benötigt, um bspw. auch die Vegetation im Rasterbild differenzieren zu können. Außerdem wird eine Synergie mit den zuvor beschriebenen Registrierungsalgorithmen vermutet, indem stabile Bereiche segmentiert werden. Im zweiten Schritt des Auswerteprozesses ist das Potential weiterer Verfahren zu prüfen. Im Speziellen bieten sich die Verfahren F2S3 (Gojcic et al., 2020) oder die Einbindung von virtuellen Zielmarken nach Raffl und Holst (2022) zur Anwendung auf den vorliegenden Datensatz an.

Die anwendungsoptimierte Verwendung von Segmentierungsmethoden und die damit verbundene Ableitung beschreibender Merkmale, die einen Bewegungsprozess an einem Überwachungsobjekt eindeutig definieren, haben ein enormes Potential, zukünftig in zentralen Wissensdatenbanken aggregiert zu werden. Die Vision, dass zukünftig an einer Vielzahl verteilter Monitoringprojekte allgemein anerkannte Kennzahlen generiert werden, bietet die Möglichkeit, die Wissensbasis im Netz kontinuierlich zu erweitern und somit wertvolle Erkenntnisse zum direkten Einfluss des Klimawandels auf die zu vermessenden Objekte zu erhalten.

A. Ergebnisse der Systemuntersuchung in Unna-Hemmerde (21.03.2022)

Tab. A.1.: Genauigkeitsanalyse der Prismendetektion (Längskomponente) an der Kalibrierbasis Unna-Hemmerde am 21.03.2022.

STP	Von	Nach	Zeit	Ref. [m]	Messung [m]	ε_i [m]
1	1	4	10:25	317,7074	317,7109	0,0035
1	1	4	10:35		317,7109	0,0034
1	1	4	10:45		317,7107	0,0033
1	1	4	11:05		317,7119	0,0045
1	6	8	10:25	423,5668	423,5665	-0,0003
1	6	8	10:35		423,5678	0,0010
1	6	8	10:45		423,5685	0,0017
1	6	8	10:55		423,5691	0,0023
1	6	8	11:05		423,5685	0,0017
3	4	5	13:10	211,7373	211,7382	-0,0009
3	4	6	13:10	458,7720	458,7726	-0,0006
3	4	6	13:20		458,7729	-0,0009
3	4	8	13:10	882,3353	882,3361	-0,0008
3	4	8	13:20		882,3348	0,0005
3	5	6	13:00	247,0348	247,0358	-0,0010
3	5	6	13:10		247,0344	0,0004
3	5	8	13:00	670,5989	670,5992	-0,0003
3	5	8	13:10		670,5992	0,0001
3	6	8	13:00	423,5668	423,5659	0,0009
3	6	8	13:10		423,5672	-0,0004
3	6	8	13:20		423,5653	0,0015
3	6	8	13:40		423,5658	0,0010
				$[\varepsilon_i \varepsilon_i] =$	0,00007515 m^2	
				$\sigma_x =$	0,0018 m	
				$\sigma_P =$	0,0013 m	

Tab. A.2.: Bestimmung der Nullpunktkorrektion (RIEGL VZ-2000i & LEICA GPR121) an der Kalibrierbasis Unna-Hemmerde am 21.03.2022.

STP	Von	Nach	Zeit	Ref. [m]	Messung [m]	x_i [m]	v_i [m]
1	1	6	10:25	776,4794	776,4776	-0,0018	-0,0022
1	1	6	10:35		776,4761	-0,0033	-0,0007
1	1	6	10:45		776,4752	-0,0042	0,0002
1	1	6	11:05		776,4763	-0,0031	-0,0009
1	1	8	10:25	1.200,0419	1.200,0401	-0,0018	-0,0021
1	1	8	10:35		1.200,0400	-0,0019	-0,0021
1	1	8	10:45		1.200,0398	-0,0021	-0,0019
1	1	8	11:05		1.200,0408	-0,0011	-0,0029
1	3	6	10:25	635,2741	635,2711	-0,0030	-0,0010
1	3	6	10:35		635,2702	-0,0039	-0,0001
1	3	6	10:45		635,2695	-0,0046	0,0006
1	3	6	10:55		635,2692	-0,0049	0,0009
1	3	6	11:05		635,2705	-0,0036	-0,0004
1	3	8	10:25	1.058,8368	1.058,8337	-0,0031	-0,0009
1	3	8	10:35		1.058,8342	-0,0026	-0,0014
1	3	8	10:45		1.058,8342	-0,0026	-0,0014
1	3	8	10:55		1.058,8345	-0,0023	-0,0017
1	3	8	11:05		1.058,8352	-0,0016	-0,0024
1	4	6	10:25	458,7720	458,7667	-0,0053	0,0013
1	4	6	10:35		458,7653	-0,0067	0,0028
1	4	6	10:45		458,7645	-0,0075	0,0035
1	4	6	10:55		458,7651	-0,0069	0,0029
1	4	6	11:05		458,7645	-0,0075	0,0035
1	4	8	10:25	882,3353	882,3299	-0,0054	0,0014
1	4	8	10:35		882,3298	-0,0055	0,0015
1	4	8	10:45		882,3298	-0,0055	0,0015
1	4	8	10:55		882,3309	-0,0044	0,0004
1	4	8	11:05		882,3296	-0,0057	0,0017
					$\bar{x}$ =	-0,004 m	
					k_0 =	-0,002 m	
					$[v_i v_i]$ =	0,00009469 m^2	
					s_x =	0,0019 m	
					$s_{\bar{x}}$ =	0,0004 m	
					s_{k_0} =	0,0002 m	

Tab. A.3.: Genauigkeitsanalyse der Prismendetektion (Querkomponente) an der Kalibrierbasis Unna-Hemmerde am 21.03.2022. Teil I.

STP	Von	Nach	Zeit	Ref. [m]	Messung [m]	ε_i [m]
2	1	4	11:40		317,7257	-0,0183
2	1	4	11:50		317,7310	-0,0236
2	1	4	12:00	317,7074	317,7336	-0,0262
2	1	4	12:10		317,7329	-0,0255
2	1	4	12:20		317,7315	-0,0241
2	1	5	11:40		529,4820	-0,0373
2	1	5	11:50		529,4892	-0,0445
2	1	5	12:00	529,4447	529,4882	-0,0435
2	1	5	12:10		529,4889	-0,0442
2	1	5	12:20		529,4886	-0,0439
2	1	6	11:40		776,4974	-0,0180
2	1	6	11:50		776,5025	-0,0231
2	1	6	12:00	776,4794	776,5187	-0,0393
2	1	6	12:10		776,5118	-0,0324
2	1	6	12:20		776,4978	-0,0184
2	1	8	11:40		1.200,0553	-0,0134
2	1	8	11:50		1.200,0431	-0,0012
2	1	8	12:00	1.200,0419	1.200,0445	-0,0026
2	1	8	12:10		1.200,0629	-0,0210
2	1	8	12:20		1.200,0344	0,0075
2	4	5	11:40		211,7564	-0,0190
2	4	5	11:50		211,7582	-0,0209
2	4	5	12:00	211,7373	211,7545	-0,0172
2	4	5	12:10		211,7560	-0,0187
2	4	5	12:20		211,7571	-0,0198
2	4	6	11:40		458,7717	0,0002
2	4	6	11:50		458,7715	0,0005
2	4	6	12:00	458,7720	458,7851	-0,0131
2	4	6	12:10		458,7789	-0,0069
2	4	6	12:20		458,7663	0,0057
2	4	8	11:40		882,3303	0,0050
2	4	8	11:50		882,3128	0,0225
2	4	8	12:00	882,3353	882,3116	0,0237
2	4	8	12:10		882,3308	0,0045
2	4	8	12:20		882,3037	0,0316
...	...	...	...	...	...	...

Tab. A.4.: Genauigkeitsanalyse der Prismendetektion (Querkomponente) an der Kalibrierbasis Unna-Hemmerde am 21.03.2022. Teil II.

STP	**Von**	**Nach**	**Zeit**	**Ref. [m]**	**Messung [m]**	ε_i **[m]**
...	...	...	...	...	...	...
2	5	6	11:40		247,0154	0,0194
2	5	6	11:50		247,0133	0,0215
2	5	6	12:00	247,0348	247,0305	0,0043
2	5	6	12:10		247,0229	0,0119
2	5	6	12:20		247,0092	0,0256
2	5	8	11:40		670,5746	0,0243
2	5	8	11:50		670,5553	0,0436
2	5	8	12:00	670,5989	670,5577	0,0412
2	5	8	12:10		670,5754	0,0235
2	5	8	12:20		670,5473	0,0516
2	6	8	11:40		423,5616	0,0052
2	6	8	11:50		423,5445	0,0223
2	6	8	12:00	423,5668	423,5294	0,0371
2	6	8	12:10		423,5549	0,0119
2	6	8	12:20		423,5406	0,0262
				$[\varepsilon_i \varepsilon_i] =$	0,03241558 m^2	
				$\boldsymbol{\sigma_x} =$	0,0255 m	
				$\boldsymbol{\sigma_P} =$	0,0180 m	

B. Ergebnisse der Zeitreihensegmentierung mittels k-Means

B.1. Ergebnistabellen

Tab. B.1.: Ergebnisse der kombinierten Betrachtung der beiden Auswahlkriterien (Summen der Abweichungsquadrate und Silhouettenkoeffizient) für die Wahl eines Modells mit der optimalen Anzahl von k-Clustern.

	vgl. Abb. 6.7a		vgl. Abb. 6.7b
k	Summe der Abweichungsquadrate [m]	Änderungsrate [m]	s_k
2	4,509	-	0,666
3	3,912	-0,597	0,589
4	3,759	-0,153	0,291
5	3,615	-0,144	0,302
6	3,564	-0,051	0,306
7	3,431	-0,133	0,306
8	3,381	-0,050	0,311
9	3,351	-0,030	0,301
10	3,346	-0,005	0,309
11	3,323	-0,023	0,273
12	3,256	-0,067	0,274
13	3,273	0,017	0,228
14	3,241	-0,032	0,274
15	3,238	-0,003	0,247
20	3,168	-0,070	0,212
25	3,121	-0,047	0,229
30	3,099	-0,022	0,194
35	3,083	-0,016	0,210
40	3,069	-0,014	0,164
45	3,032	-0,037	0,145
50	3,028	-0,004	0,140

Tab. B.2.: Ergebnisse der kombinierten Betrachtung der beiden Auswahlkriterien (Summen der Abweichungsquadrate und Silhouettenkoeffizient) für die Wahl eines Modells mit der optimalen Anzahl von k-Clustern im räumlich reduzierten Bereich.

	vgl. Abb. 6.15a		vgl. Abb. 6.15b
k	Summe der Abweichungsquadrate [m]	Änderungsrate [m]	s_k
2	0,661	-	0,881
3	0,467	-0,194	0,785
4	0,383	-0,084	0,795
5	0,315	-0,068	0,785
6	0,271	-0,044	0,644
7	0,240	-0,031	0,618
8	0,222	-0,018	0,589
9	0,210	-0,012	0,583
10	0,207	-0,003	0,419
11	0,192	-0,015	0,412
12	0,178	-0,014	0,406
13	0,168	-0,010	0,405
14	0,160	-0,008	0,204
15	0,158	-0,002	0,194

Tab. B.3.: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Modellberechnung *k=50* inkl. aggregierter subjektiver Klassifizierung.

Segment	Anz. Rasterzellen	[%]	SD [m]	Klasse
39	148.924	59,9	0,030	A.
4	59.645		0,043	
9	30.707		0,074	
33	4.274		0,162	
12	17.528	17,4	0,047	B.
49	14.609		0,055	
29	12.661		0,045	
10	7.749		0,043	
19	5.942		0,072	
36	5.036		0,060	
3	3.857		0,075	
17	3.325		0,086	
43	2.192	0,8	0,266	C.
40	840		0,251	
7	394		0,288	
35	1.309	0,5	0,259	D.
30	369		0,274	
20	294		0,309	
26	15.247	3,7	0,097	E.
48	13.052	17,7	0,134	F.
0	10.653		0,121	
47	7.302		0,147	
22	6.728		0,170	
6	4.921		0,193	
16	3.472		0,199	
21	3.064		0,181	
37	2.720		0,196	
8	2.663		0,261	
45	2.245		0,230	
42	2.183		0,244	
2	1.975		0,182	
41	1.930		0,253	
25	1.368		0,265	
13	1.351		0,231	
14	944		0,278	
38	937		0,298	
1	926		0,303	
34	912		0,282	
27	673		0,327	
5	619		0,355	
32	601		0,152	
31	509		0,083	
11	93		0,295	
24	6		0,462	
15	1		-	
18	1		-	
23	1		-	
28	1		-	
44	1		-	
46	1		-	
	406.755	100,0		

B.2. Zeitreihen und räumliche Visualisierung - vollständiger Bereich

Modell: k=8

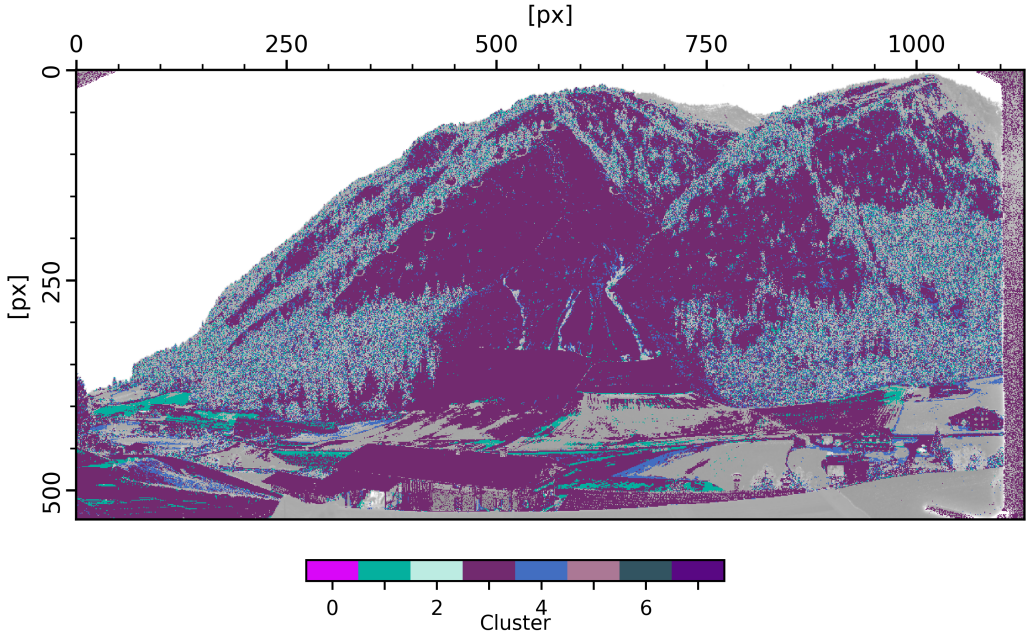


Abb. B.1.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse A. (k=8).

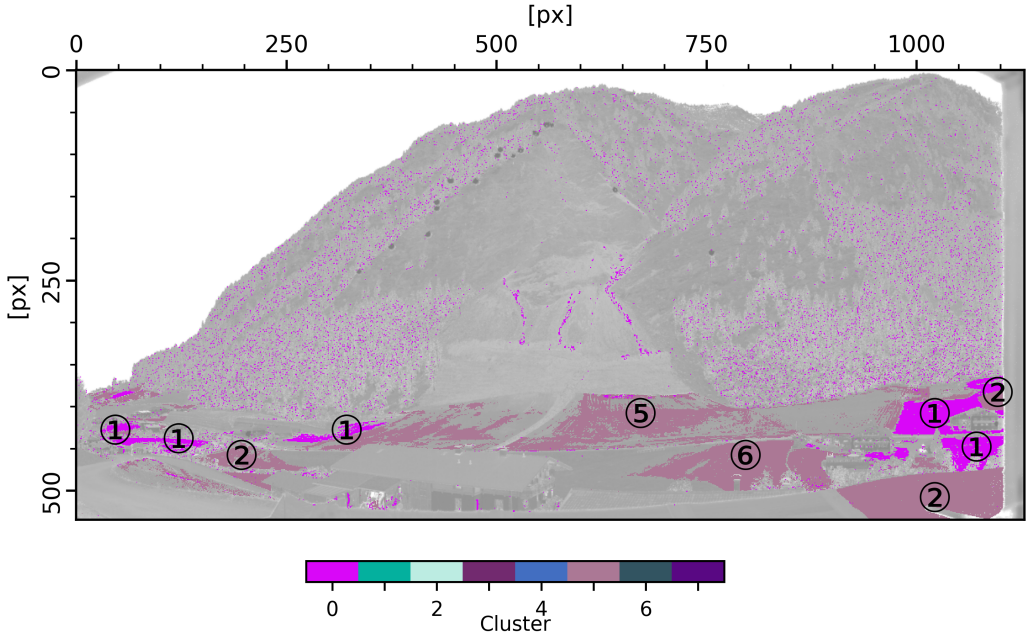


Abb. B.2.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse B. (k=8).

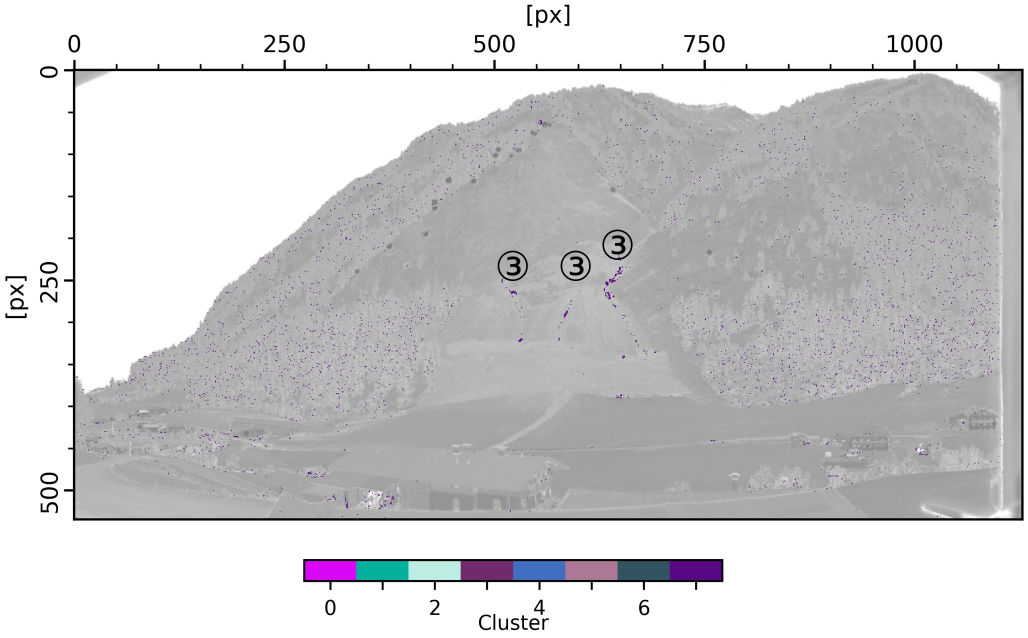


Abb. B.3.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse C. (k=8).

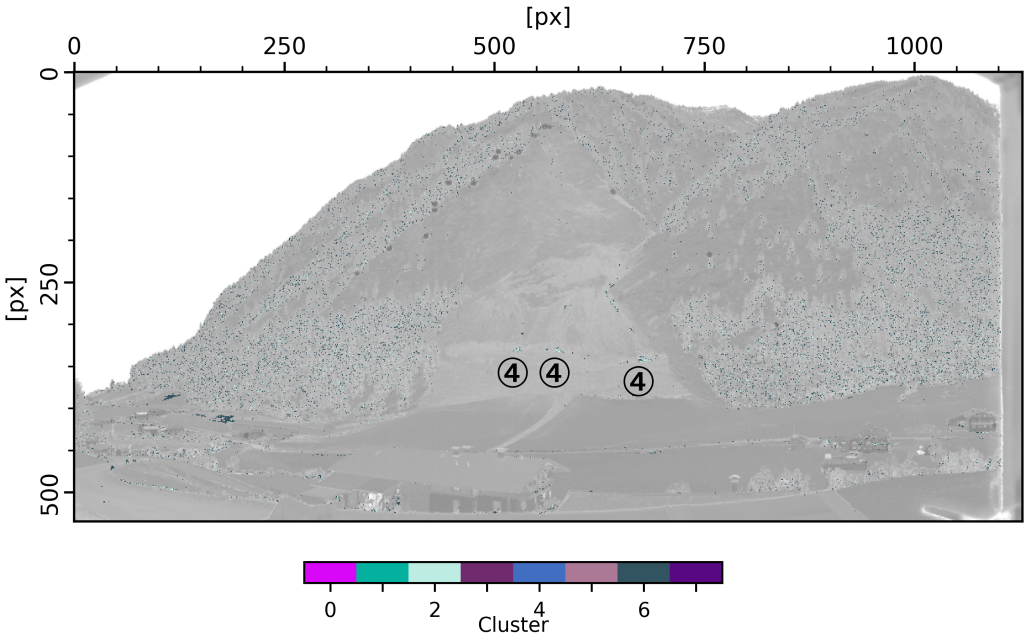
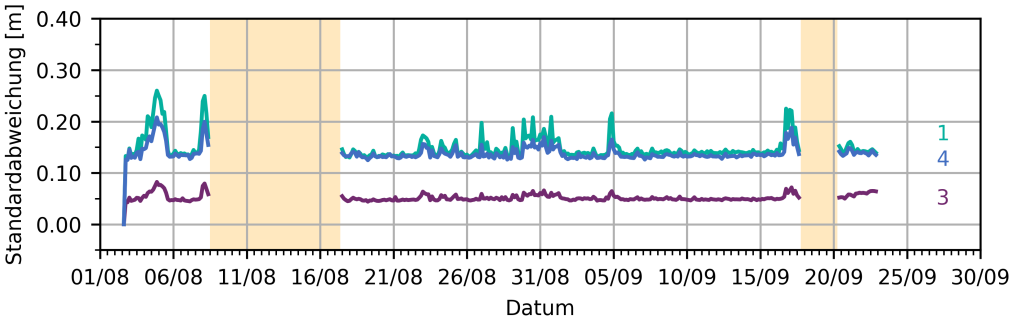
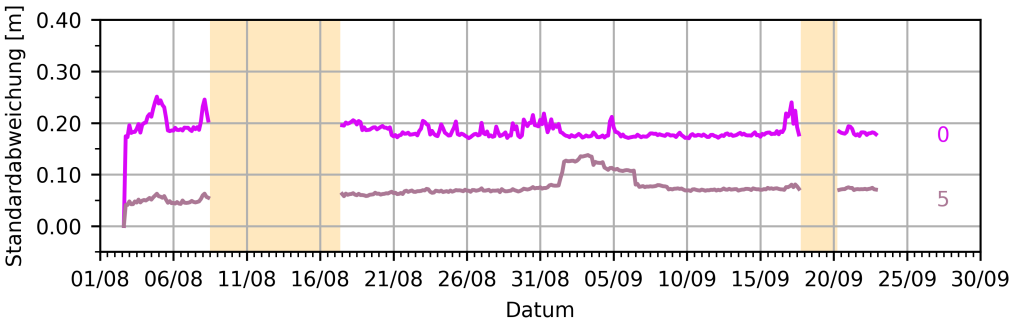


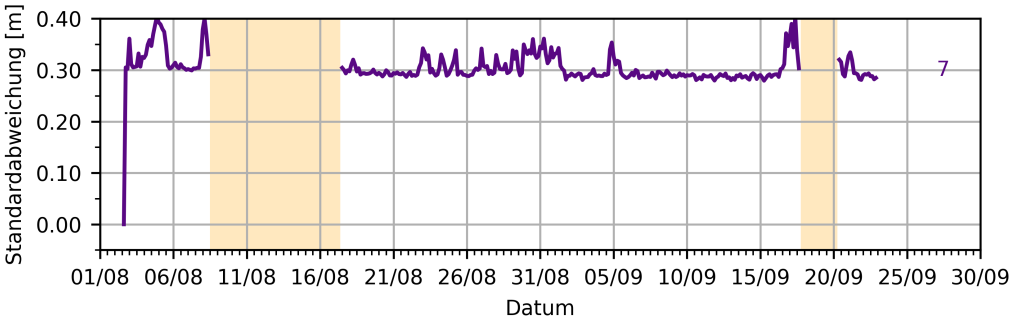
Abb. B.4.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse D. (k=8).



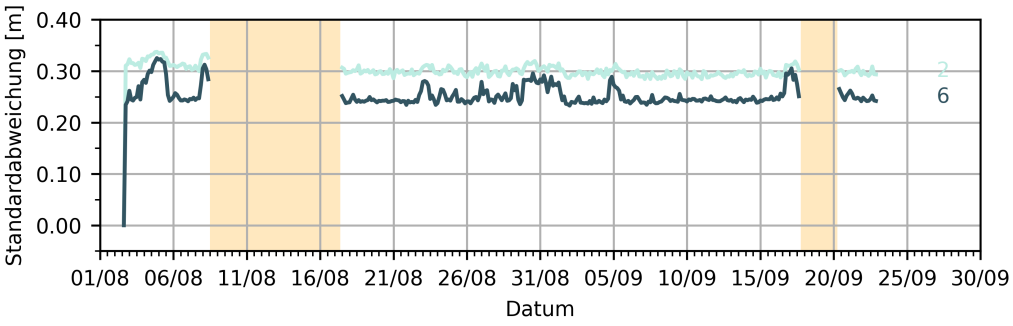
(a) Standardabweichung Klasse A.



(b) Standardabweichung Klasse B.



(c) Standardabweichung Klasse C.



(d) Standardabweichung Klasse D.

Abb. B.5.: Standardabweichung aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=8.

Modell: k=14

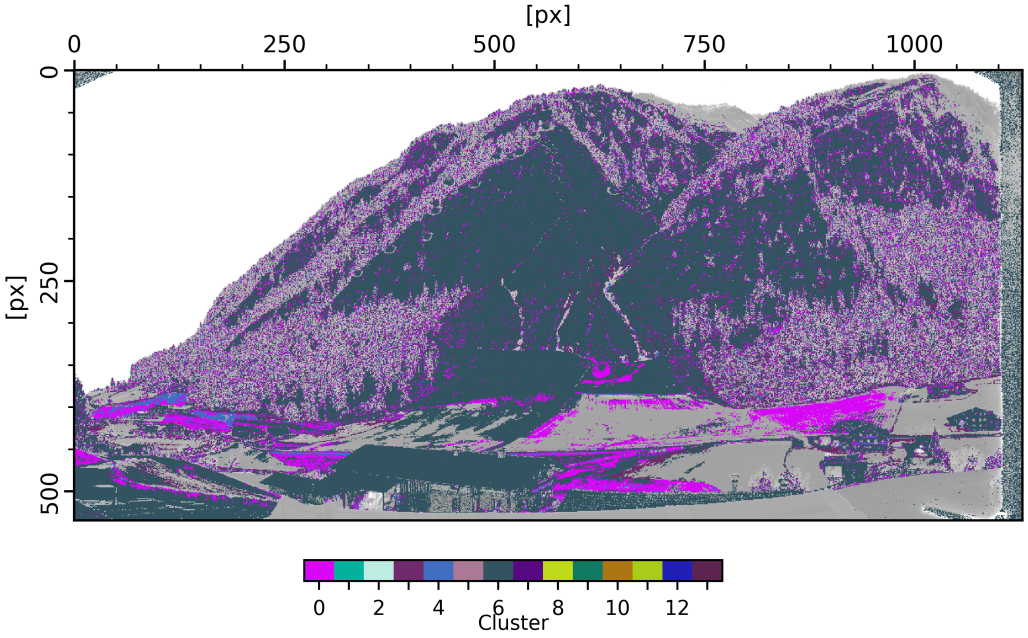


Abb. B.6.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse A. (k=14).

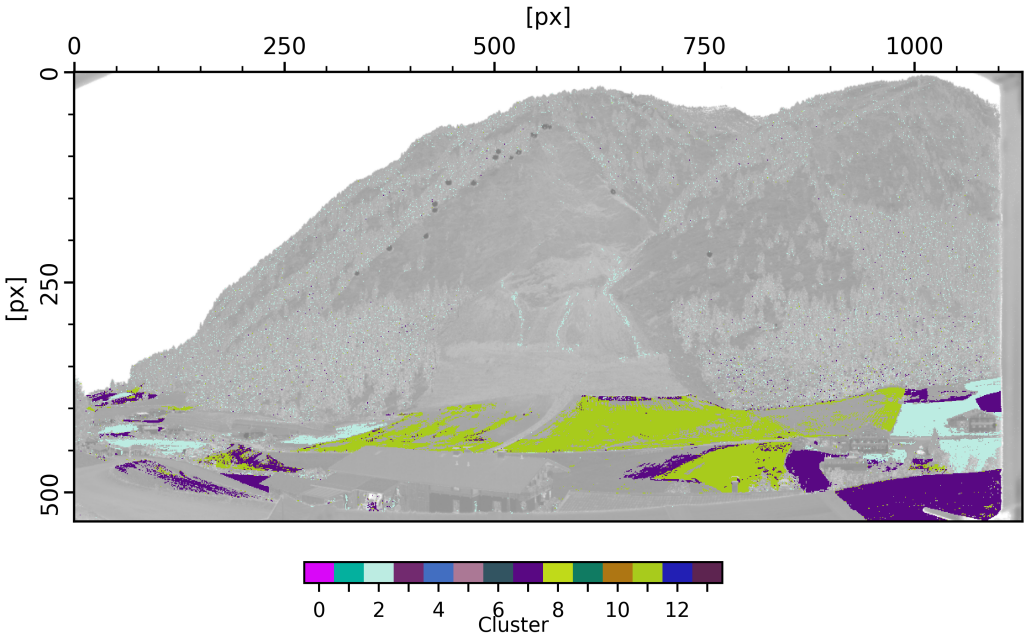


Abb. B.7.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse B. (k=14).

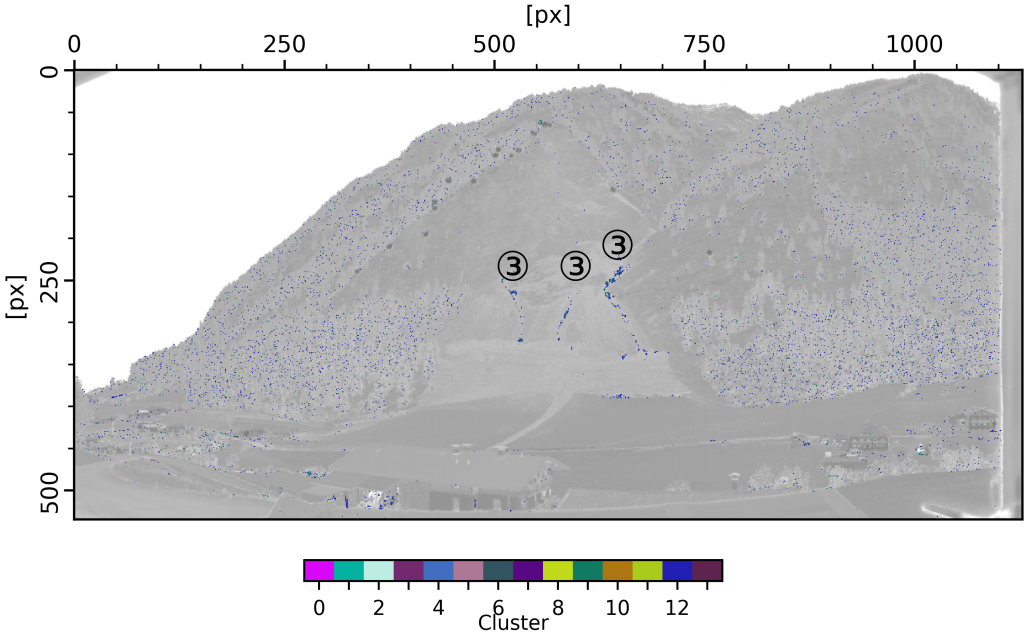


Abb. B.8.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse C. (k=14).

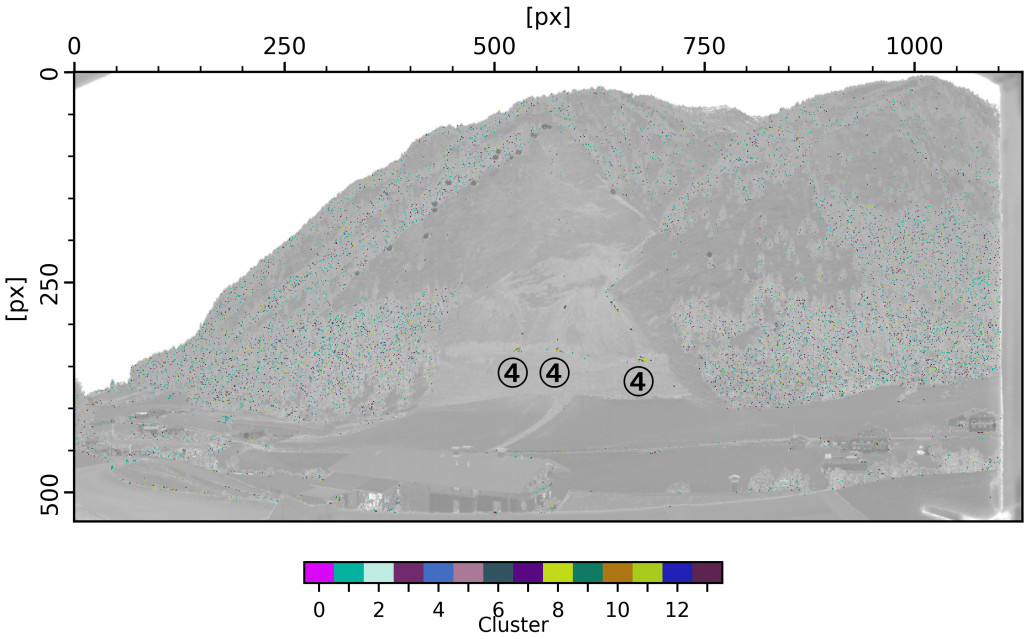


Abb. B.9.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse D. (k=14).

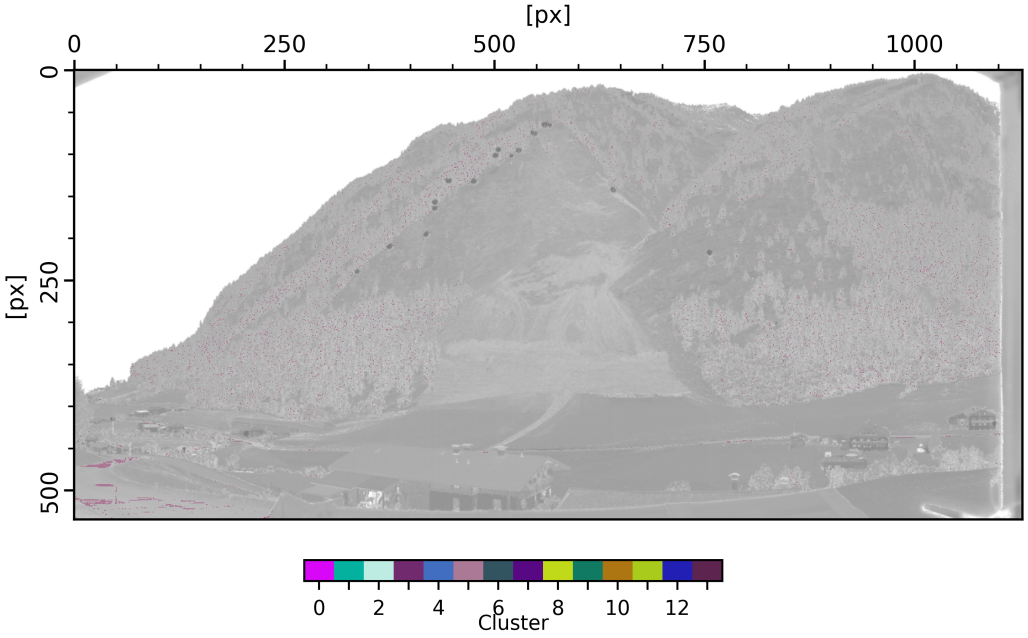
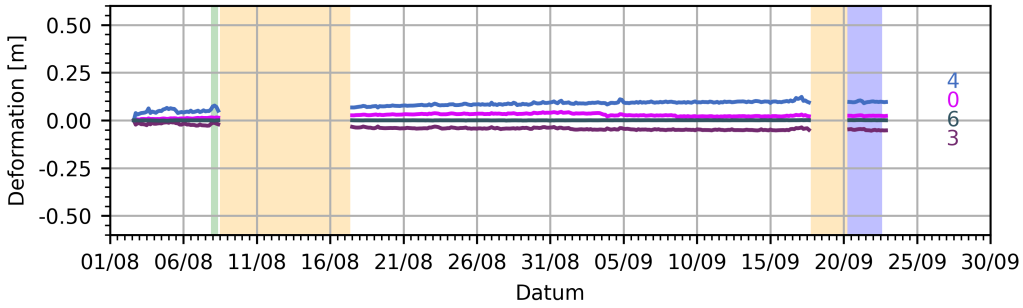
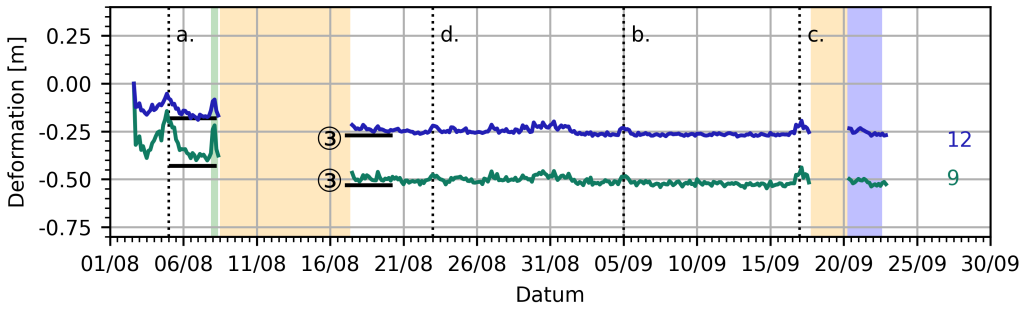


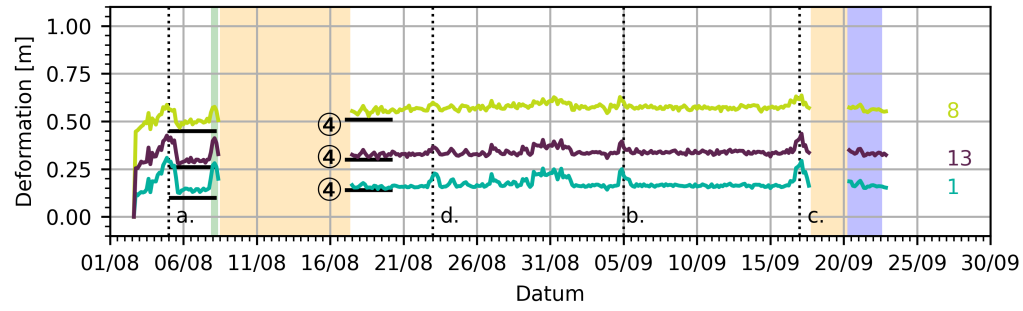
Abb. B.10.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse E. (k=14).



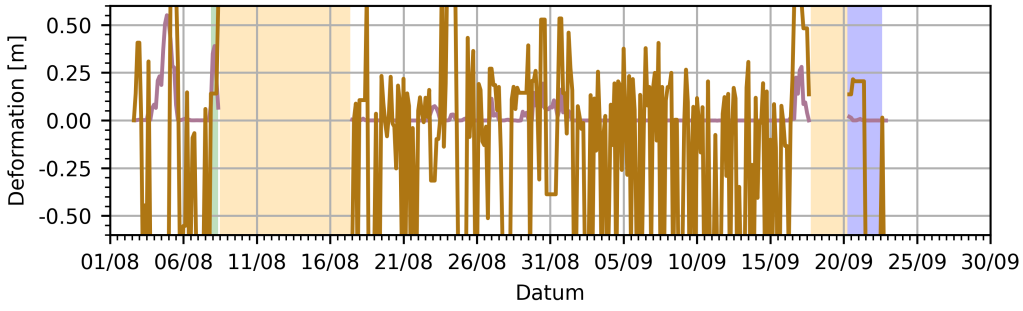
(a) Median Klasse A.



(b) Median Klasse C.

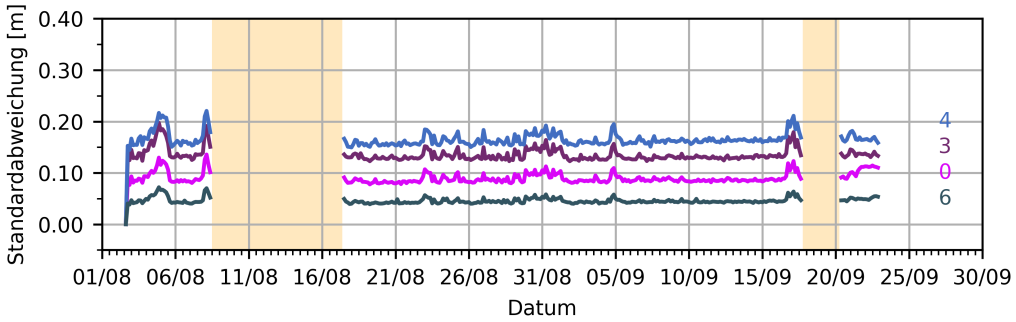


(c) Median Klasse D.

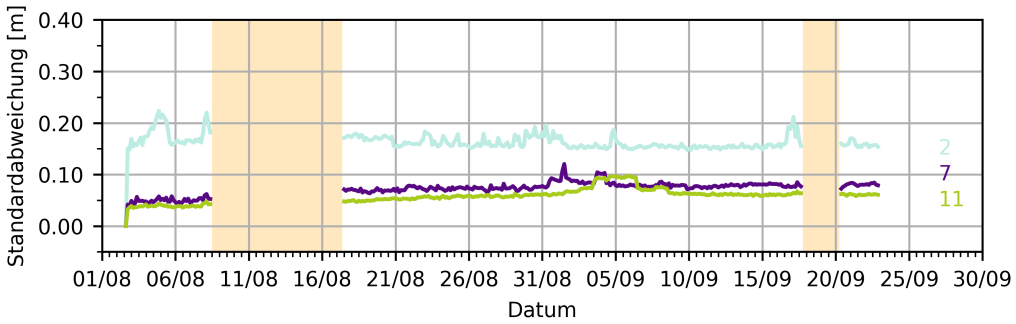


(d) Median Klasse E.

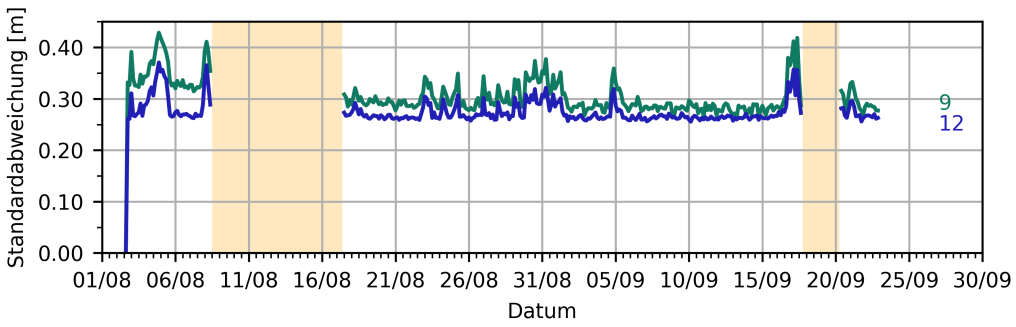
Abb. B.11.: Median aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=14.



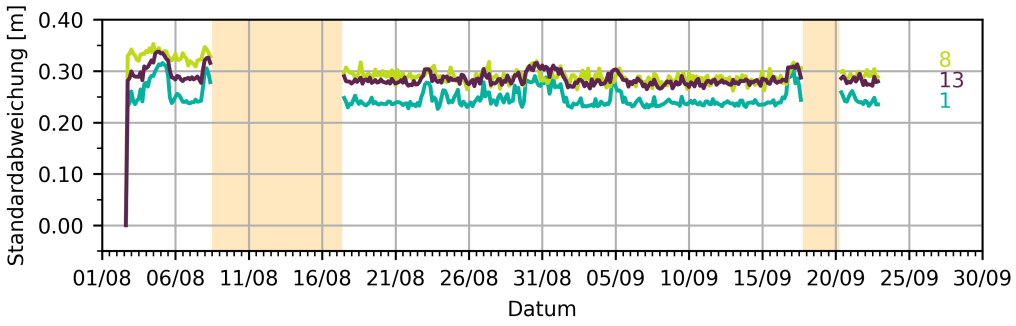
(a) Standardabweichung Klasse A.



(b) Standardabweichung Klasse B.



(c) Standardabweichung Klasse C.



(d) Standardabweichung Klasse D.

Abb. B.12.: Standardabweichung aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=14.

Modell: k=50

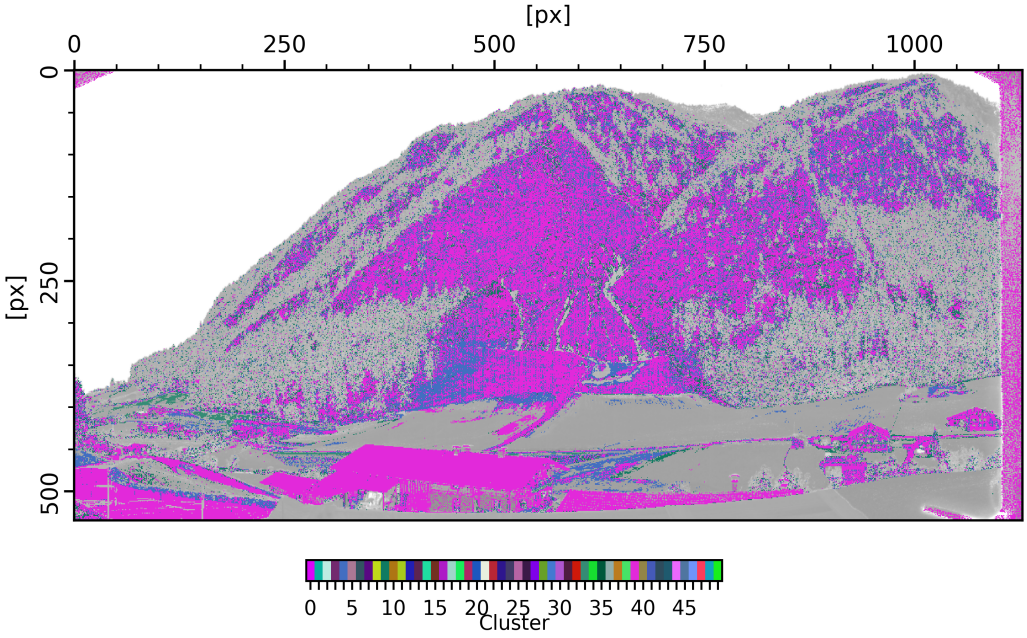


Abb. B.13.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse A. (k=50).

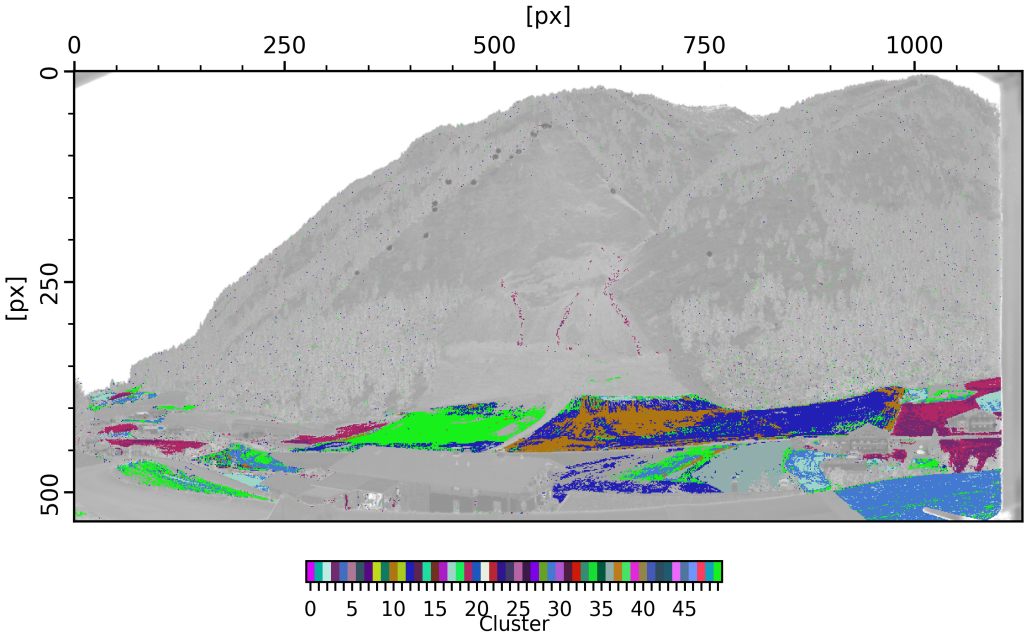


Abb. B.14.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse B. (k=50).

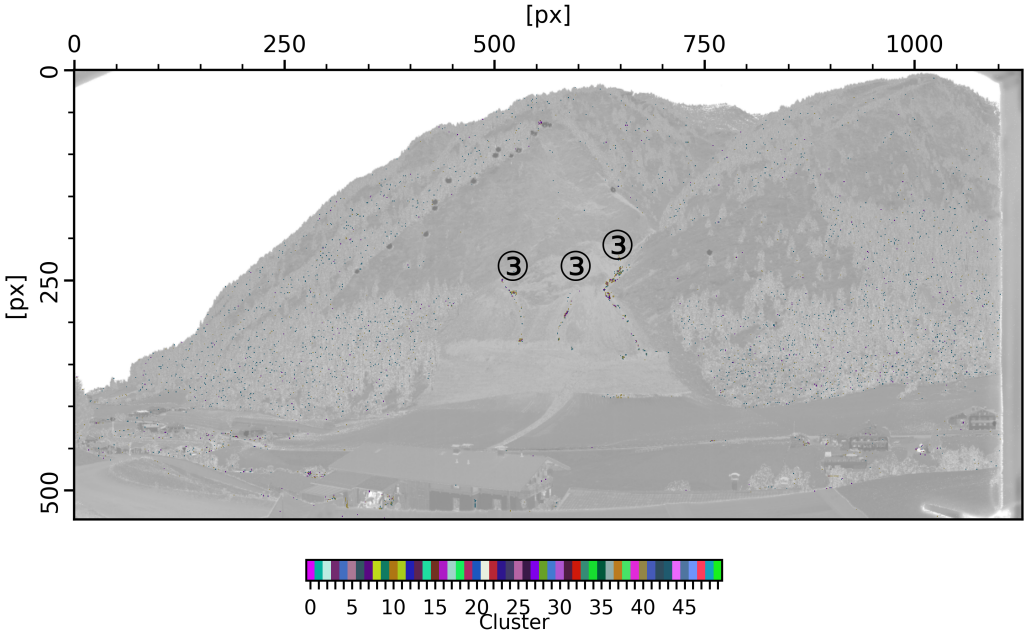


Abb. B.15.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse C. (k=50).

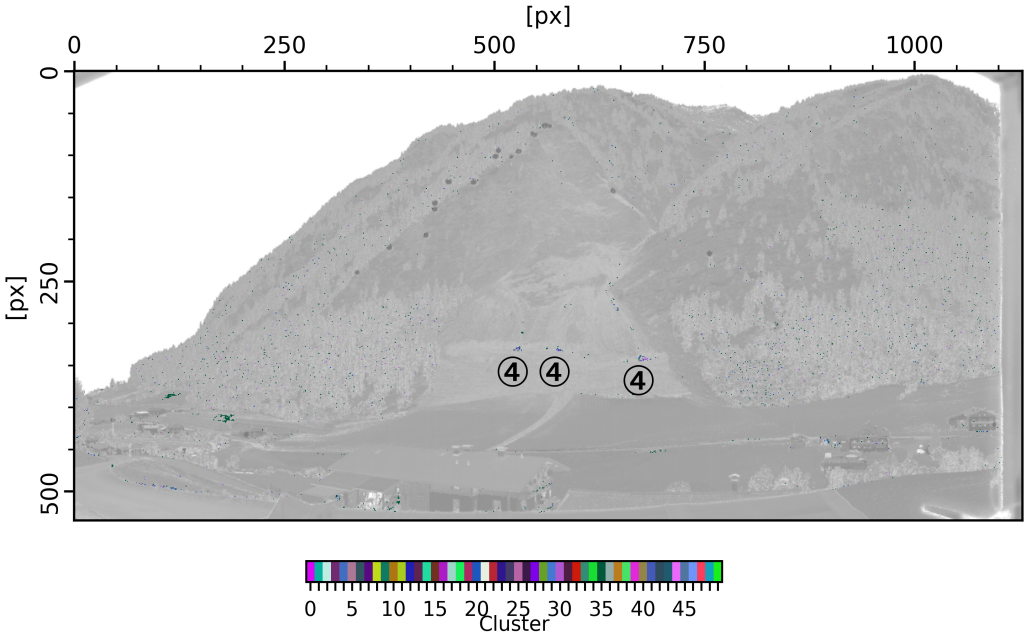


Abb. B.16.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse D. (k=50).

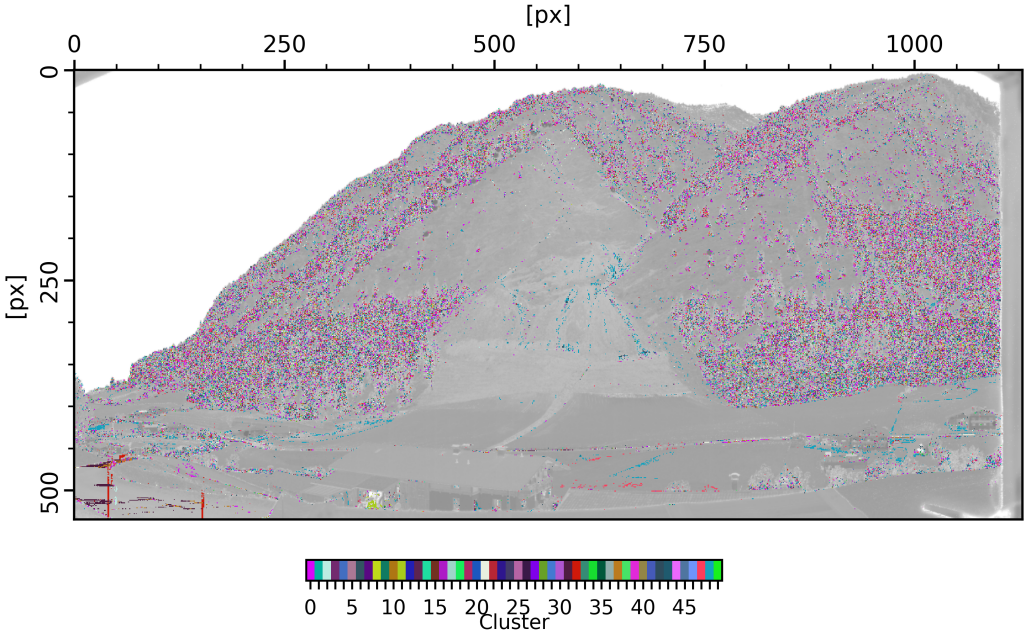


Abb. B.17.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse E. (k=50).

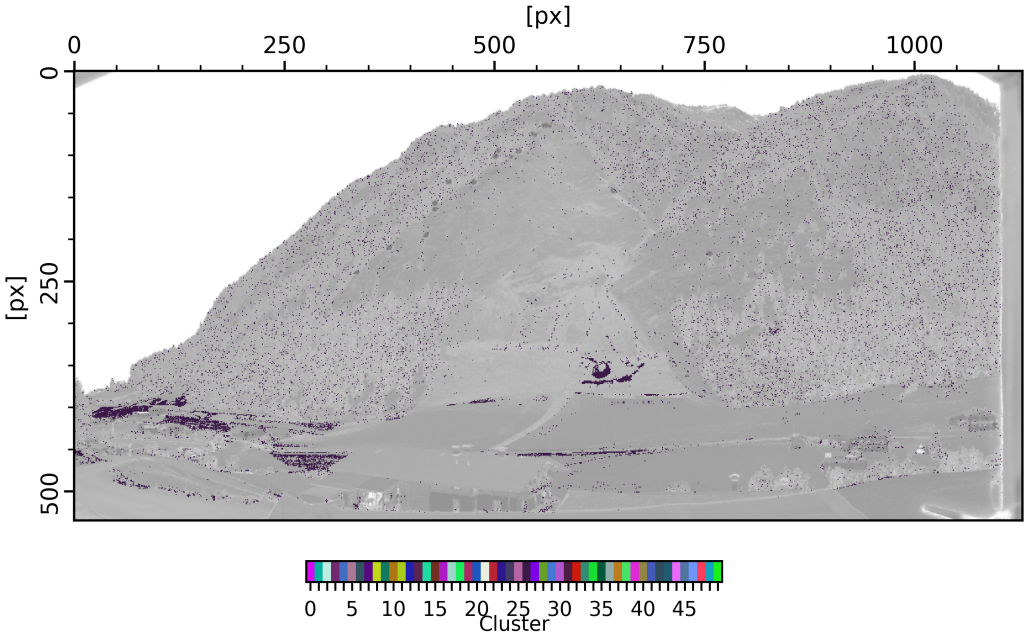
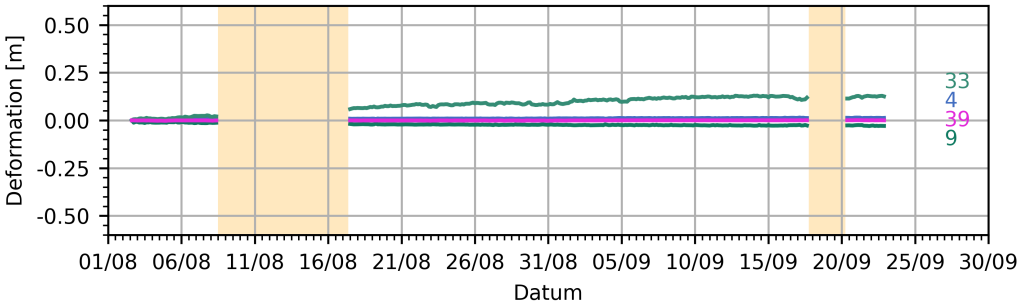
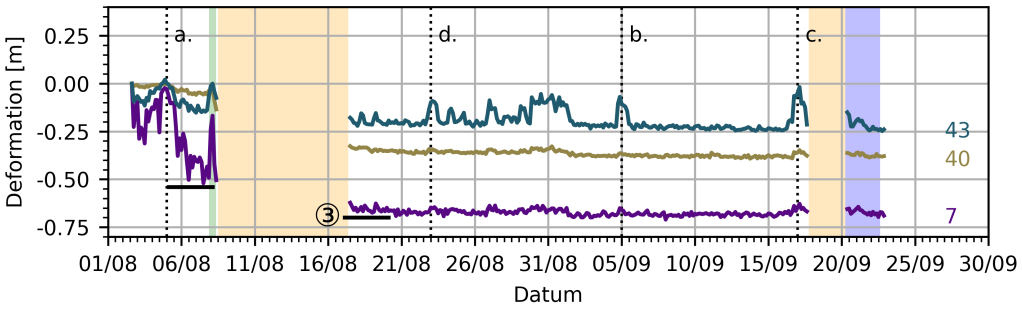


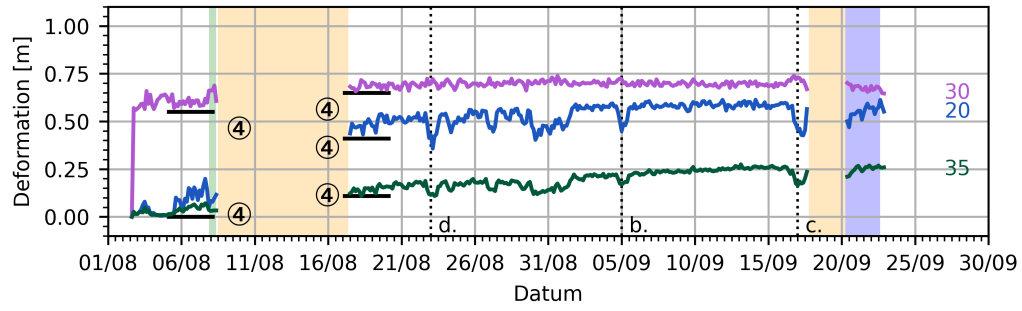
Abb. B.18.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse F. (k=50).



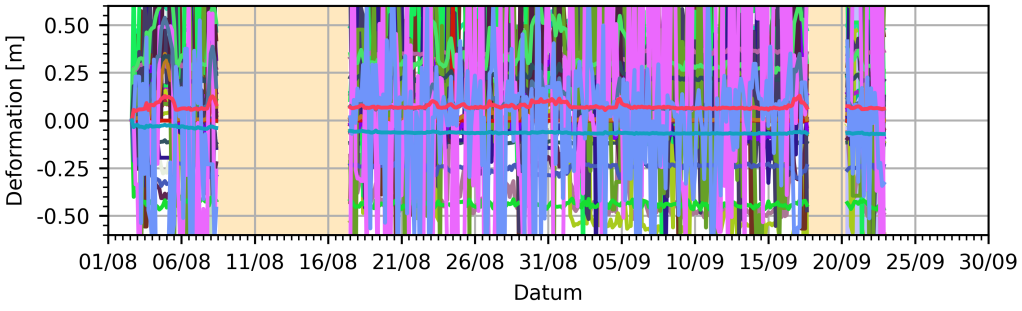
(a) Median Klasse A.



(b) Median Klasse C.

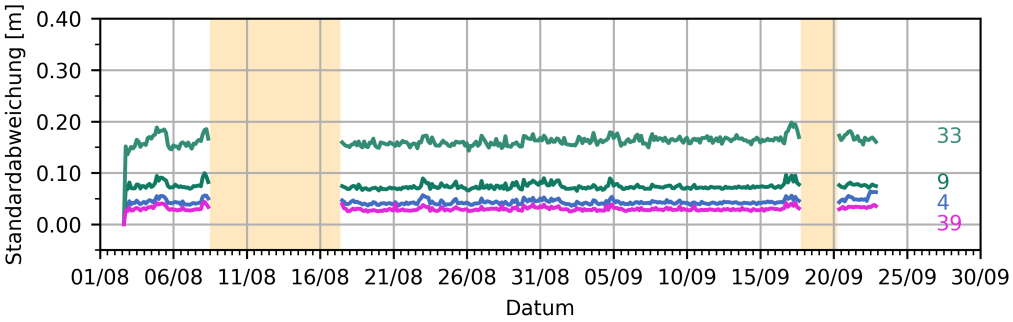


(c) Median Klasse D.

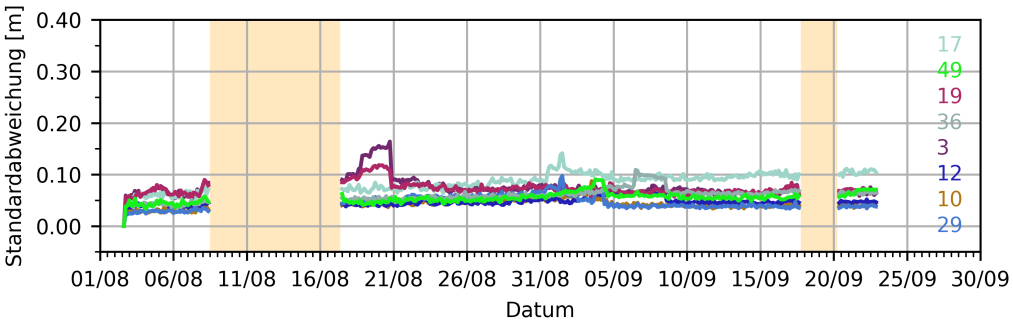


(d) Median Klasse E.

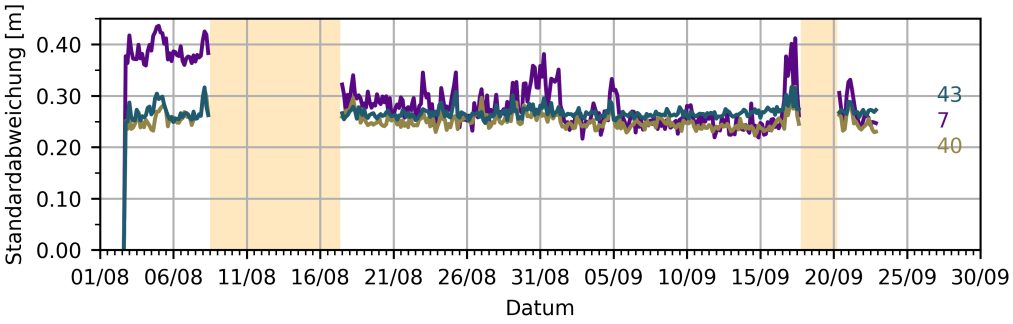
Abb. B.19.: Median aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=50.



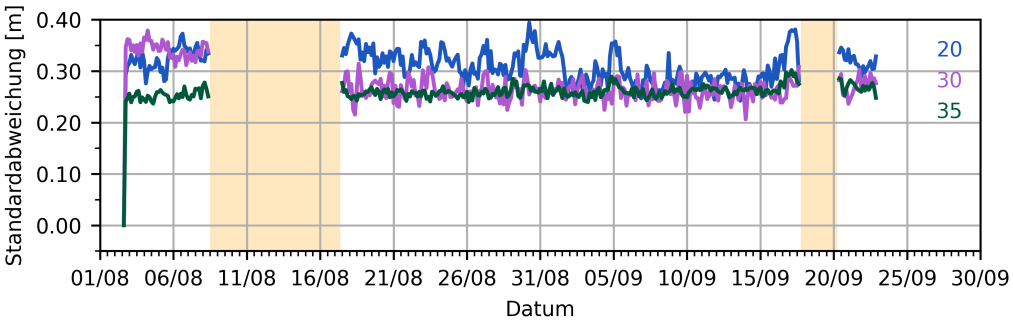
(a) Standardabweichung Klasse A.



(b) Standardabweichung Klasse B.



(c) Standardabweichung Klasse C.



(d) Standardabweichung Klasse D.

Abb. B.20.: Standardabweichung aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=50.

B.3. Zeitreihen und räumliche Visualisierung - limitierter Bereich

Modell: k=9

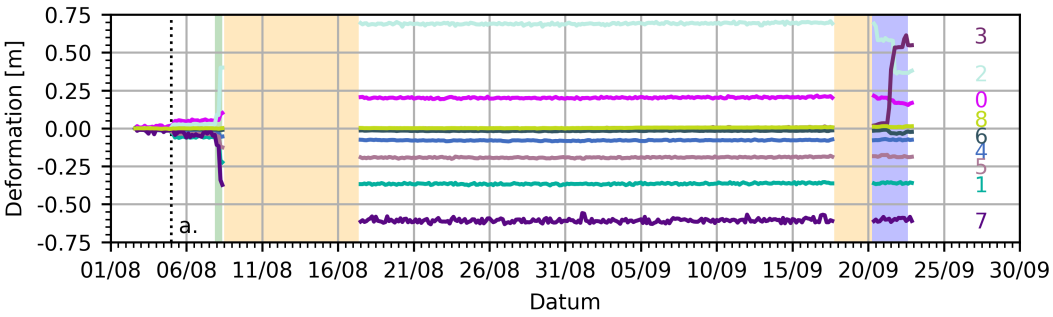


Abb. B.21.: Mittelwert aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=9.

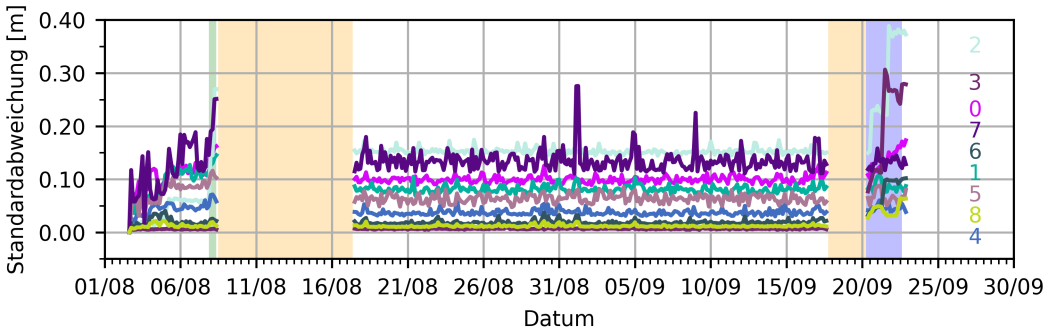
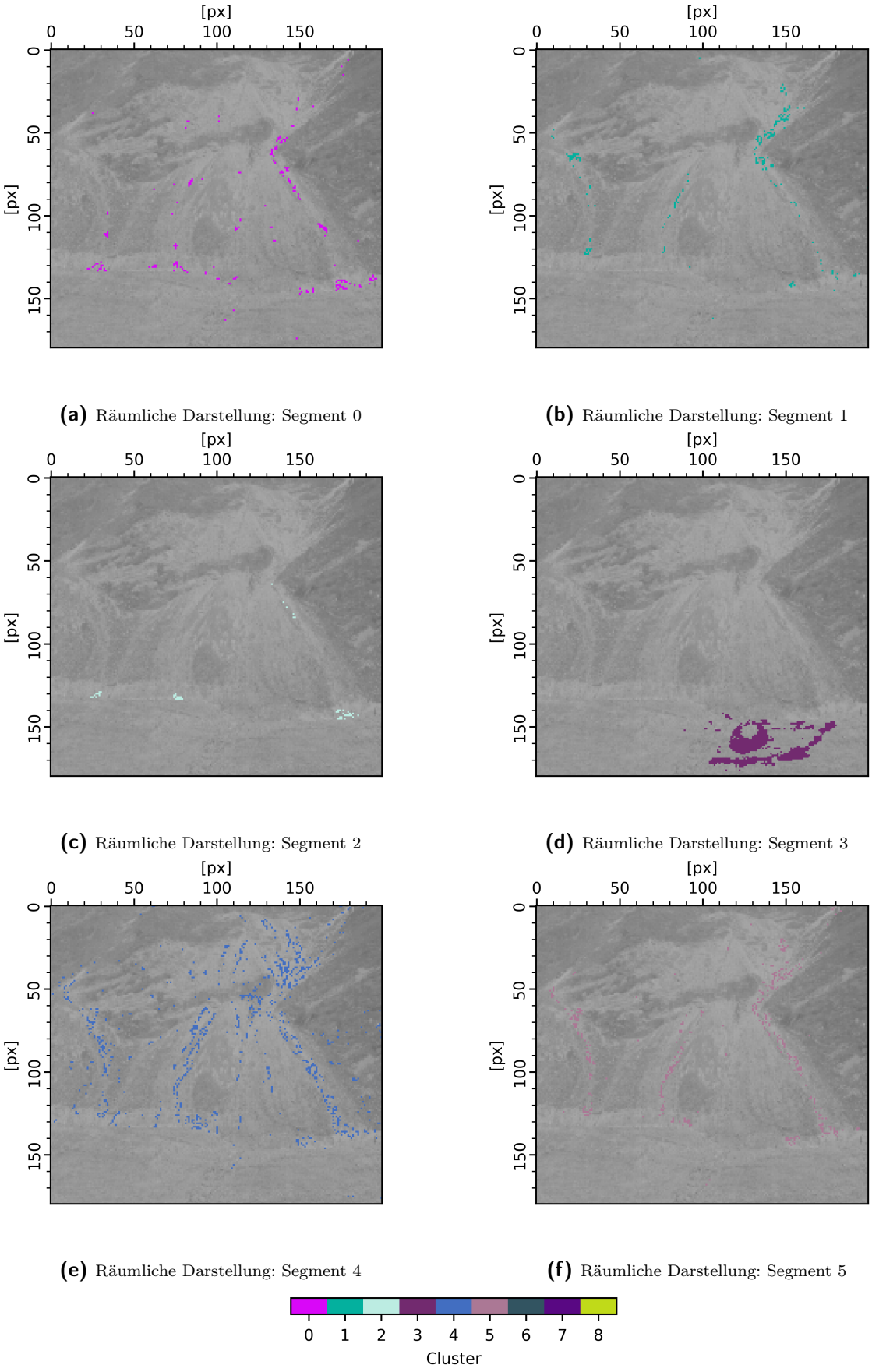


Abb. B.22.: Standardabweichung aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung für k=9.



(a) Räumliche Darstellung: Segment 0

(b) Räumliche Darstellung: Segment 1

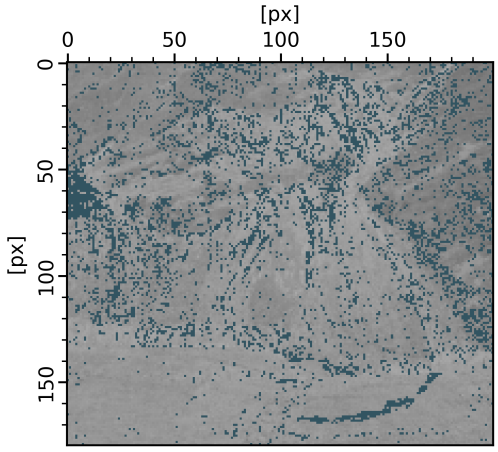
(c) Räumliche Darstellung: Segment 2

(d) Räumliche Darstellung: Segment 3

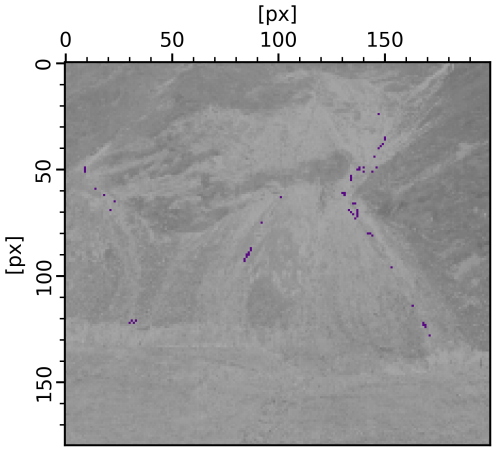
(e) Räumliche Darstellung: Segment 4

(f) Räumliche Darstellung: Segment 5

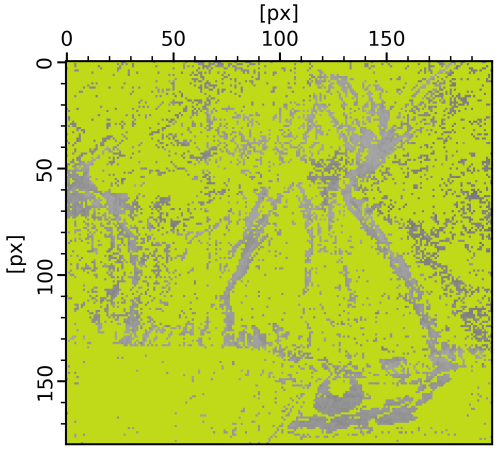
Abb. B.23.: Räumliche Darstellung der jeweiligen Segmente im Einzelbild für das Modell k=9 - Teil I: Segmente 0 bis 5. Hintergrundbild: Rasterdarstellung der Scandaten in Abhängigkeit von der Reflectance.



(a) Räumliche Darstellung: Segment 6



(b) Räumliche Darstellung: Segment 7



(c) Räumliche Darstellung: Segment 8

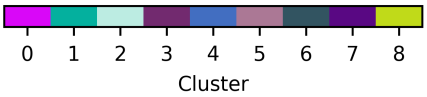


Abb. B.24.: Räumliche Darstellung der jeweiligen Segmente im Einzelbild für das Modell k=9 - Teil II: Segmente 6 bis 8. Hintergrundbild: Rasterdarstellung der Scandaten in Abhängigkeit von der Reflectance.

C. Ergebnisse der Zeitreihensegmentierung mittels GMM

C.1. Ergebnistabellen

Tab. C.1.: Ergebnisse der kombinierten Betrachtung von AIC und BIC für die Wahl eines Modells mit der optimalen Anzahl an Segmenten.

	vgl. Abb 6.19	
Segment	AIC [10^9]	BIC [10^9]
2	-2,056	-2,049
3	-2,124	-2,114
4	-2,195	-2,182
5	-2,207	-2,191
6	-2,233	-2,213
7	-2,253	-2,230
8	-2,261	-2,234
9	-2,266	-2,235
10	-2,273	-2,239
11	-2,285	-2,249
12	-2,294	-2,254
13	-2,288	-2,244
14	-2,297	-2,250
15	-2,300	-2,250
20	-2,317	-2,243
25	-2,327	-2,243
30	-2,332	-2,232
35	-2,341	-2,224
40	-2,346	-2,212
45	-2,352	-2,201
50	-2,353	-2,186
75	-2,360	-2,109
100	-2,361	-2,026
150	-2,348	-1,846

Tab. C.2.: Ergebnisse der kombinierten Betrachtung von AIC und BIC für die Wahl eines Modells mit der optimalen Anzahl an Segmenten im limitierten Bereich.

	vgl. Abb 6.27	
Segment	AIC [10^9]	BIC [10^9]
2	-0,1996	-0,1944
3	-0,2013	-0,1935
4	-0,2030	-0,1926
5	-0,2060	-0,1930
6	-0,2030	-0,1874
7	-0,2057	-0,1875
8	-0,2056	-0,1848
9	-0,2080	-0,1846
10	-0,2079	-0,1819
11	-0,2073	-0,1787
12	-0,2078	-0,1766
13	-0,2070	-0,1732
14	-0,2068	-0,1704
15	-0,2074	-0,1684
20	-0,2058	-0,1539
25	-0,2046	-0,1396

C.2. Zeitreihen und räumliche Visualisierung - vollständiger Bereich

Modell: 12 Cluster

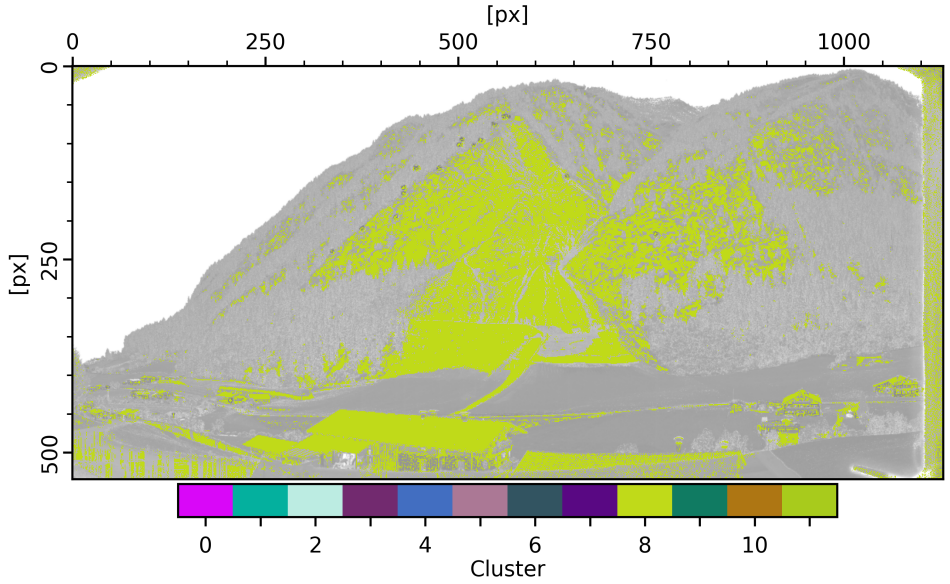


Abb. C.1.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse A. (12 Cluster).

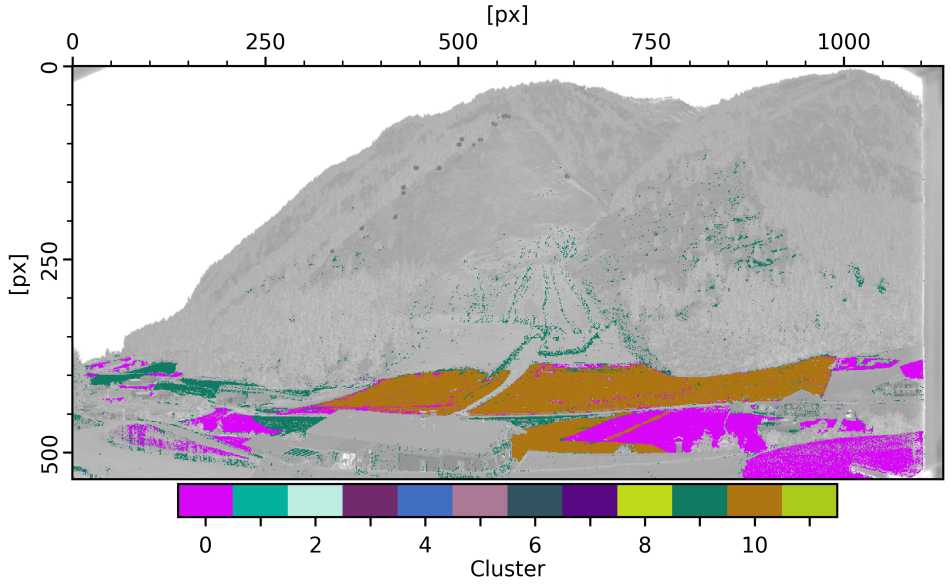


Abb. C.2.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse B. (12 Cluster).

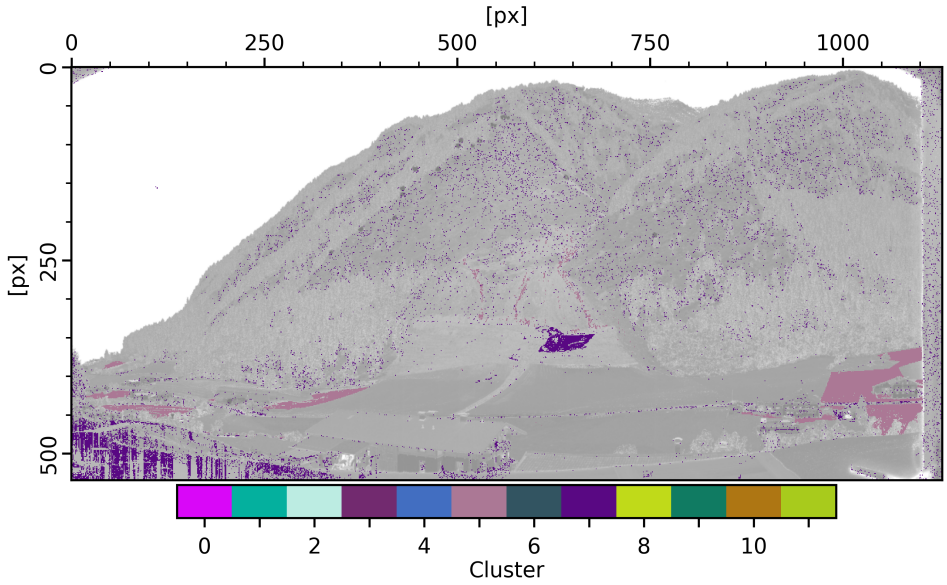


Abb. C.3.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse C. und D. (12 Cluster).

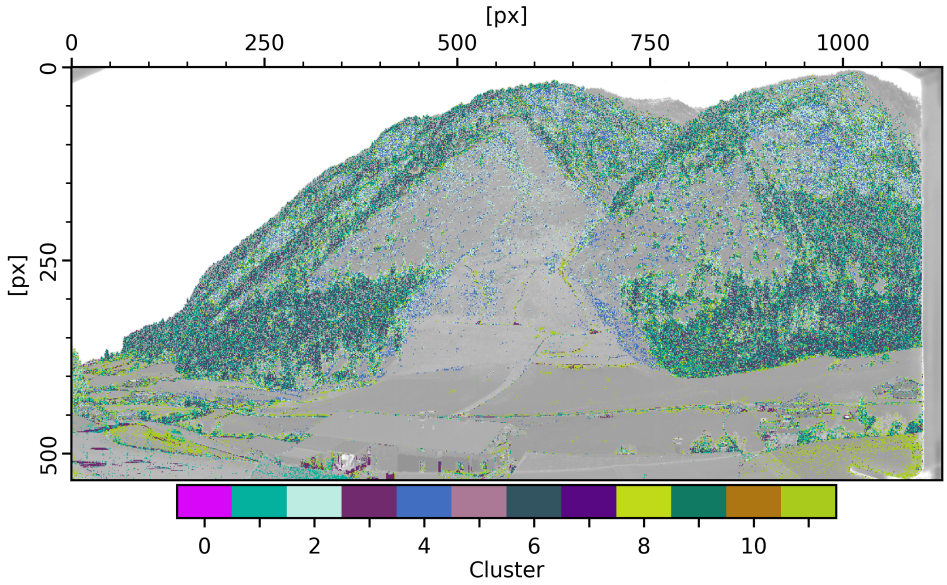


Abb. C.4.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse E. (12 Cluster).

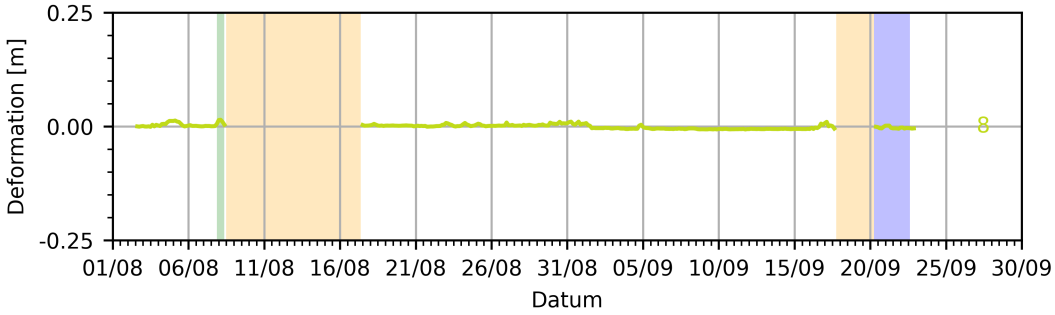


Abb. C.5.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse A. für 12 Cluster.

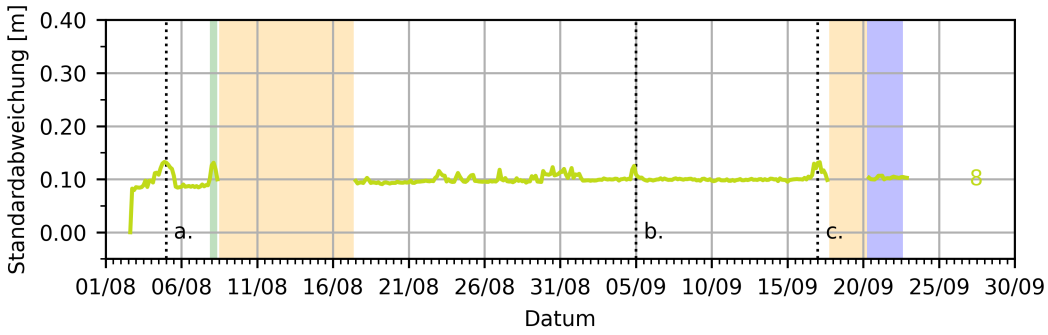


Abb. C.6.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse A. für 12 Cluster.

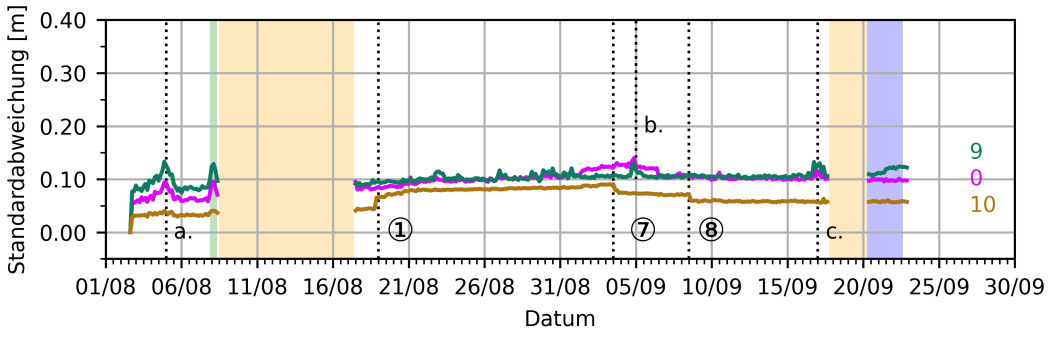


Abb. C.7.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse B. für 12 Cluster.

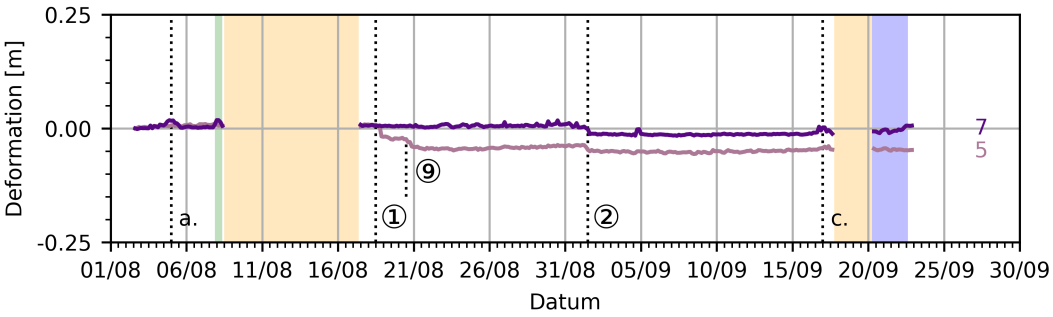


Abb. C.8.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse C. und D. für 12 Cluster.

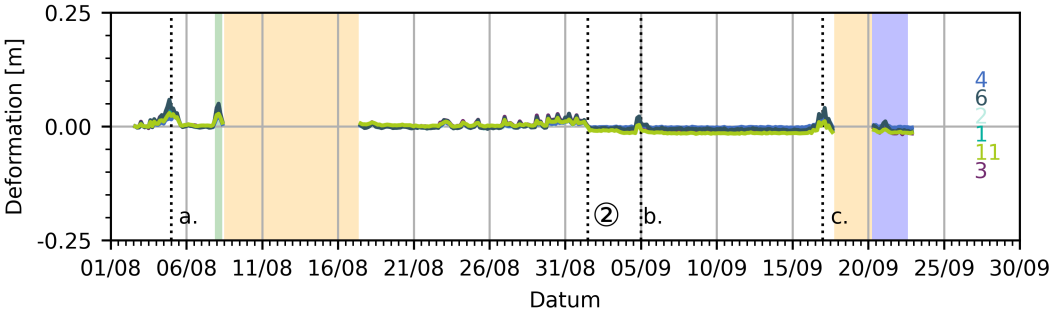


Abb. C.9.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse E. für 12 Cluster.

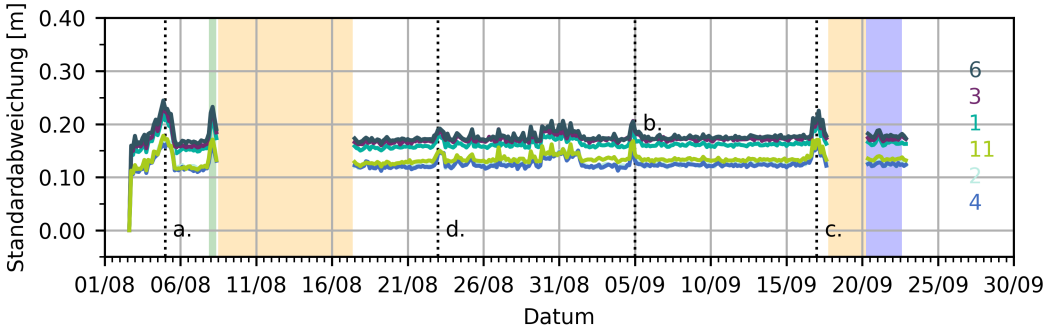


Abb. C.10.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse E. für 12 Cluster.

Modell: 100 Cluster

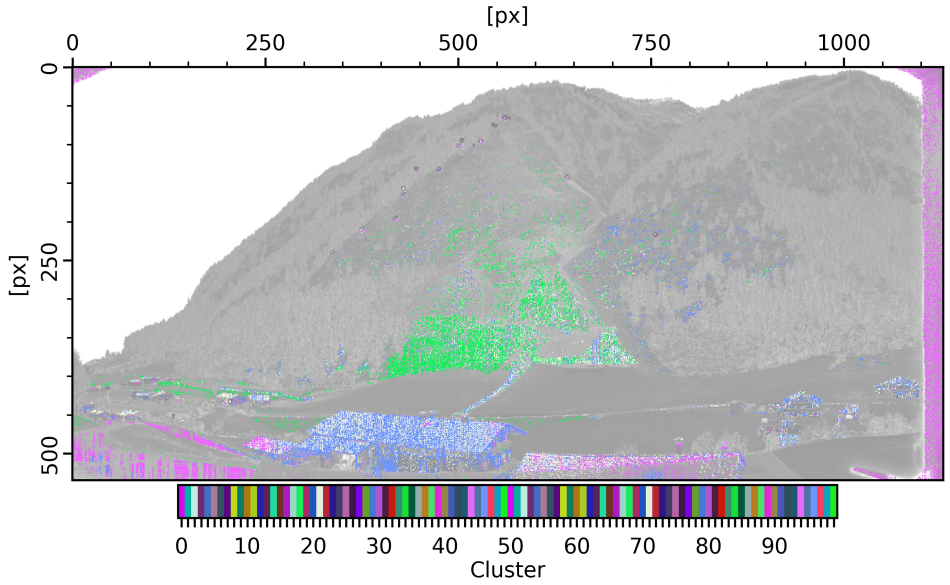


Abb. C.11.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse A. (100 Cluster).

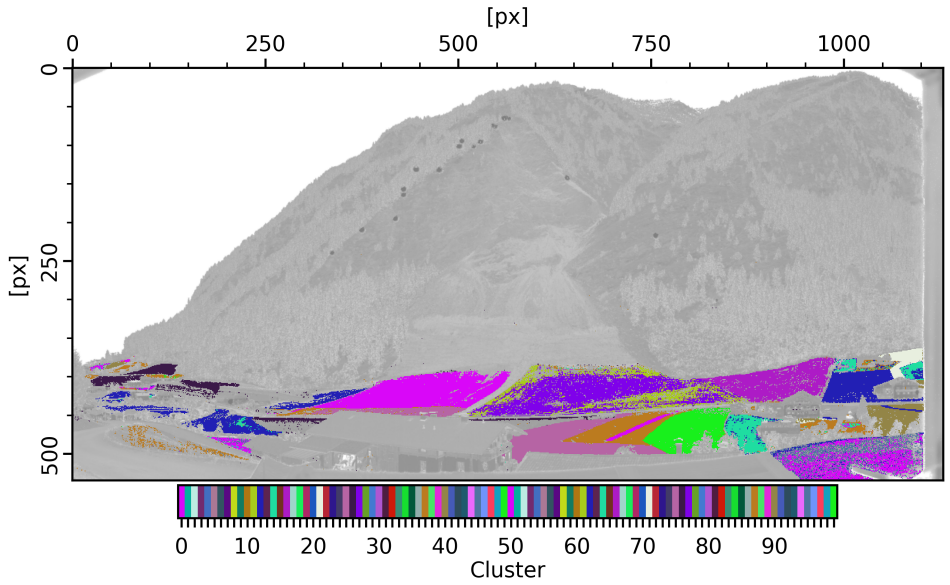


Abb. C.12.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse B. (100 Cluster).

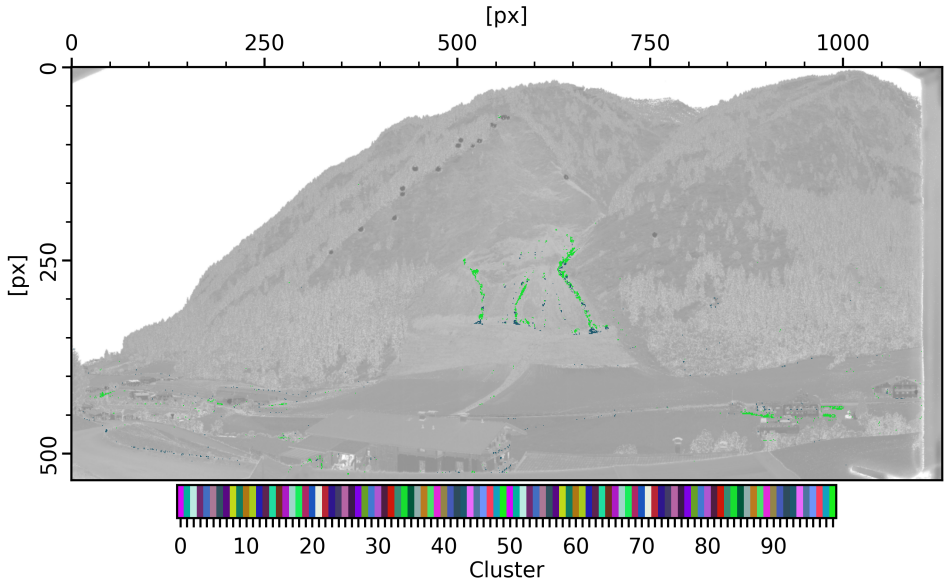


Abb. C.13.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse C. (100 Cluster).

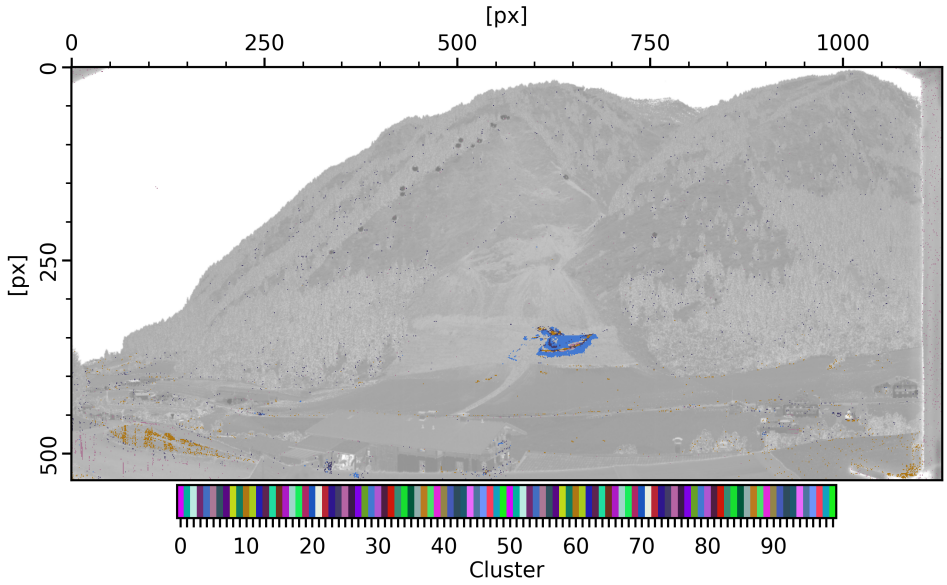


Abb. C.14.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse D. (100 Cluster).

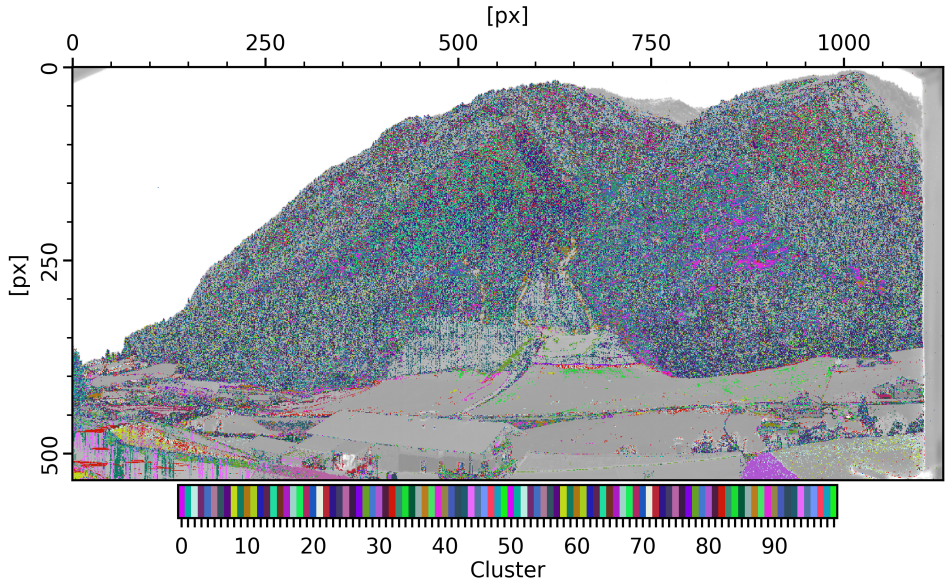


Abb. C.15.: Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für Klasse E. (100 Cluster).

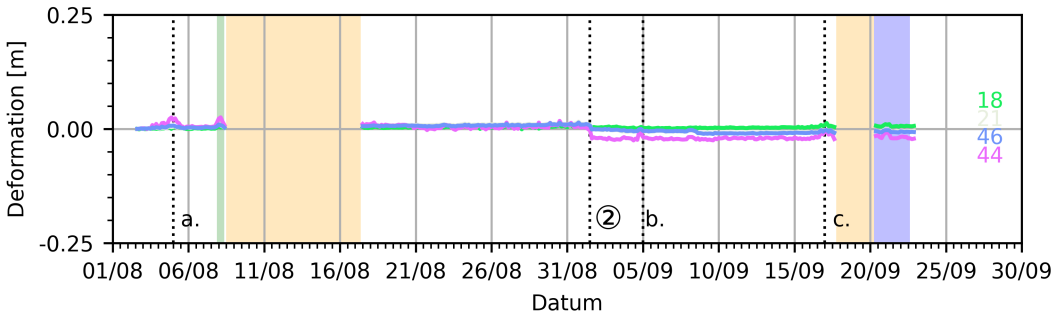


Abb. C.16.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse A. für 100 Cluster.

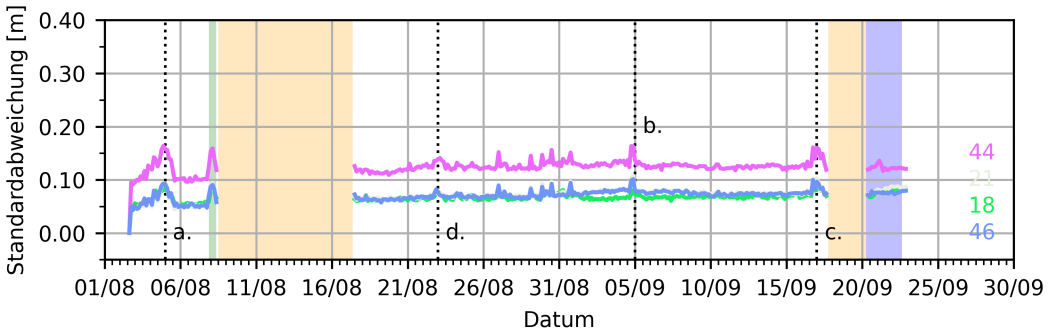


Abb. C.17.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse A. für 100 Cluster.

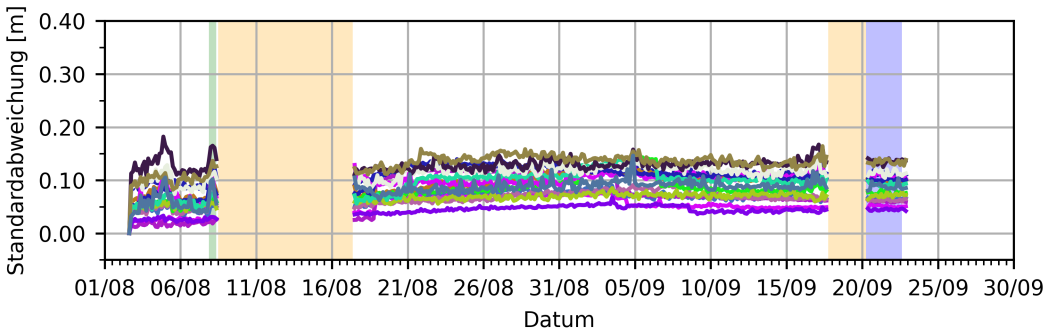


Abb. C.18.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse B. für 100 Cluster.

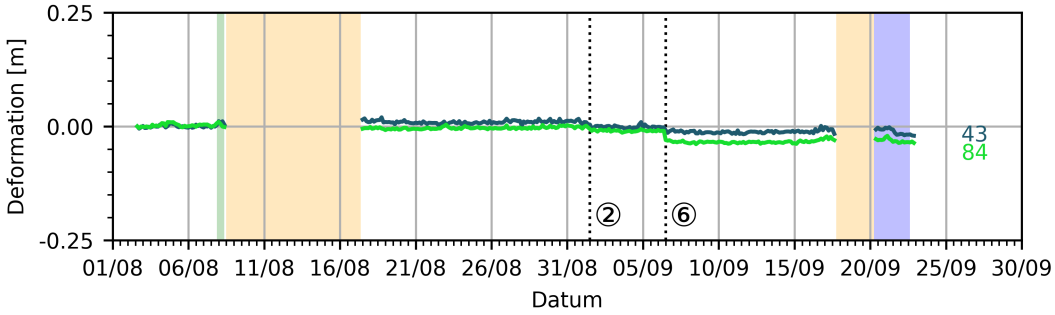


Abb. C.19.: Mittelwert der Zeitreihen von Klasse C. für 100 Cluster.

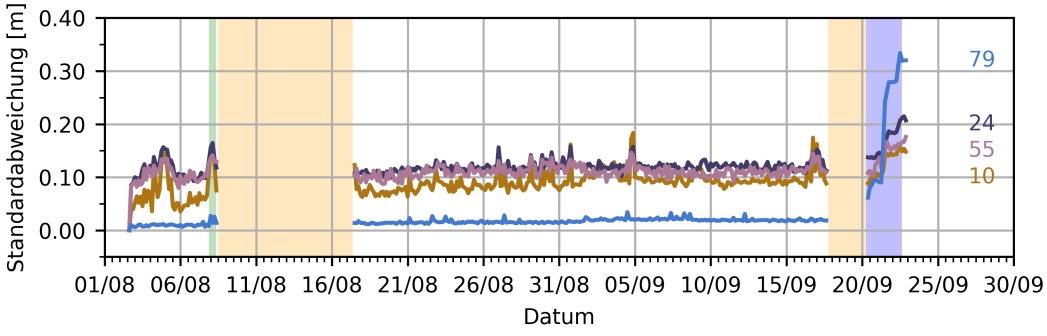


Abb. C.20.: Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse D. für 100 Cluster.

Literaturverzeichnis

Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., & Vilaplana, J. (2009). Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*(2), 365–372.

Adams, M., Bauer, A., & Paar, G. (2014). Monitoring snow avalanche terrain with Automated Terrestrial Laser Scanning. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (S. 4006–4009). https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947364

Aiger, D., Mitra, N. J., & Cohen-Or, D. (2008). 4-Points Congruent Sets for Robust Pairwise Surface Registration. *ACM Trans. Graph.*, *27*(3), 1–10. https://doi.org/10.1145/1360612.1360684

Akaike, H. (1998). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In E. Parzen, K. Tanabe & G. Kitagawa (Hrsg.), *Selected Papers of Hirotugu Akaike* (S. 199–213). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_15

Alba, M., Fregonese, L., Prandi, F., Scaioni, M., Valgoi, P., et al. (2006). Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *36*(5).

Anders, K., Lindenbergh, R. C., Vos, S. E., Mara, H., de Vries, S., & Höfle, B. (2019). High-Frequency 3d Geomorphic Observation Using Hourly Terrestrial Laser Scanning Data Of A Sandy Beach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *IV-2/W5*, 317–324. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-317-2019

Anders, K., Winiwarter, L., Schröder, D., & Höfle, B. (2022a). Integration of Kalman Filtering of Near-Continuous Surface Change Time Series into the Extraction of 4D Objects-By-Change. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B2-2022*, 973–980. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-973-2022

Anders, K., Winiwarter, L., & Höfle, B. (2022b). Improving Change Analysis From Near-Continuous 3D Time Series by Considering Full Temporal Information. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *19*, 1–5. https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3148920

Anders, K., Winiwarter, L., Lindenbergh, R., Williams, J. G., Vos, S. E., & Höfle, B. (2020). 4D objects-by-change: Spatiotemporal segmentation of geomorphic surface change from LiDAR time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *159*, 352–363. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.025

Anders, K., Winiwarter, L., Mara, H., Lindenbergh, R., Vos, S. E., & Höfle, B. (2021). Fully automatic spatiotemporal segmentation of 3D LiDAR time series for the extraction of natural surface changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *173*, 297–308. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.01.015

Anderson, S. W. (2019). Uncertainty in quantitative analyses of topographic change: error propagation and the role of thresholding. *Earth Surface Processes and Landforms*, *44*(5), 1015–1033.

Anegg, J., & Fritzmann, P. (2019). *Geomonitoring am Felssturz im Valsertal*. Verfügbar 28. Januar 2023 unter https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/sicherheit/geoinformation/Monitoring/Vals_2019_Anegg_Fritzmann_Online.pdf

Angus-Leppan, P. (1969). Surface effects on refraction in precise levelling. *REF-EDM Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement*, 74–89.

Bahnert, G. (1987). Zur Bestimmung lokaler Refraktionskoeffizienten. *VT Heft*, *35*(1), 14–17.

Barbarella, M., Fiani, M., & Lugli, A. (2015). Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *6*(5-7), 398–418. https://doi.org/10.1080/19475705.2013.863808

Barbarella, M., Fiani, M., & Lugli, A. (2017). Uncertainty in terrestrial laser scanner surveys of landslides. *Remote Sensing*, *9*(2), 113.

Bartelt, S., & Wieben, H.-J. (2017). Ganzheitliches Risikomanagement nach ISO 31000 im mittelständischen Maschinen-und Anlagenbau Ganzheitliches Risikomanagement nach ISO 31000. *Controller Magazin*, (1), 16–22.

Benndorf, J. (2021). Geomonitoring und Markscheidewesen als integrativer Teil des Umweltmanagements in der Rohstoff- und Energiebranche – zukünftige Aufgaben. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *128*(5), 237–247.

Benning, W. (2011). *Statistik in Geodäsie, Geoinformation und Bauwesen*. Wichmann.

Berger, S., Hofmann, R., & Wimmer, L. (2021). Einwirkungen auf starre Barrieren durch fließähnliche gravitative Massenbewegungen. *geotechnik*, *44*(2), 77–91. https://doi.org/10.1002/gete.202000026

Berndt, D. J., & Clifford, J. (1994). Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series. *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 359–370.

Besl, P., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *14*(2), 239–256. https://doi.org/10.1109/34.121791

Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.

Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A., et al. (2004). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *35*(B5), 246–251.

Bosché, F. (2012). Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models [Network and Supply Chain System Integration for Mass Customization and Sustainable Behavior]. *Advanced Engineering Informatics*, *26*(1), 90–102. https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.08.009

Bovenschulte, M., Apt, W., & Priesack, K. (2018). *Die digitale Transformation von Unternehmen*. Institut für Innovation und Technik (iit).

Bremer, M., Zieher, T., Pfeiffer, J., Petrini-Monteferri, F., & Wichmann, V. (2019). Monitoring der Großhangbewegung Reissenschuh (Schmirntal, Tirol) mit TLS

und UAV-basiertem Laserscanning. In K. Hanke & T. Weinold (Hrsg.), *20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019* (S. 321–330). Wichmann.

Brocks, K. (1939). Vertikaler Temperaturgradient und terrestrische Refraktion, insbesondere im Hochgebirge. *Veröffentlichungen des Meteorologischen Instituts der Universität Berlin*, *3*(4).

Brocks, K. (1950). Meteorologische Hilfsmittel für die geodätische Höhenmessung. *Zeitschrift für Vermessungswesen,(3)*, 71–76.

Brunner, F. K. (1984). Overview of Geodetic Refraction Studies. In F. K. Brunner (Hrsg.), *Geodetic Refraction - Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere* (S. 1–6). Springer.

Brunner, F. K. (1992). Refraction, Refractive Index and Dispersion: Some Relevant History. In J. De Munck & T. Spoelstra (Hrsg.), *Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy* (S. 3–9). Netherlands Geodetic Commision.

Brunner, F. K., & Woschitz, H. (2011). Über die Erweiterung des ingenieurgeodätischen Monitorings. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *118*(6), 212–218.

Campos, M., Litkey, P., Wang, Y., Chen, Y., Hyyti, H., Hyyppä, J., & Puttonen, E. (2020). A Terrestrial Laser Scanning Measurement Station to Monitor Long-Term Structural Dynamics in a Boreal Forest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B1-2020*, 27–31. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-27-2020

Canli, E., Thiebes, B., Höfle, B., & Glade, T. (2015). Permanent 3D Laser Scanning System for Alpine Hillslope Instabilities. In *6th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation (DFHM): Mechanics, Prediction and Assessment*.

Casott, N., & Deussen, D. (2000). Vom Bildflimmern zur refraktionskorrigierten Vertikalwinkelmessung. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*, *107*(8/9), 286–292.

Chen, Y., & Medioni, G. (1991). Object modeling by registration of multiple range images. *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2724–2729 vol.3. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.132043

Chow, J., Ebeling, A., & Teskey, B. (2010). Low cost artificial planar target measurement techniques for terrestrial laser scanning. *Proceedings of the FIG Congress 2010*.

Christ, M., Braun, N., Neuffer, J., & Kempa-Liehr, A. W. (2018). Time Series FeatuRe Extraction on basis of Scalable Hypothesis tests (tsfresh – A Python package). *Neurocomputing*, *307*, 72–77. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.03.067

Christ, M., Kempa-Liehr, A. W., & Feindt, M. (2016). Distributed and parallel time series feature extraction for industrial big data applications. *CoRR*, *abs/1610.07717*.

Cignoni, P., Rocchini, C., & Scopigno, R. (1998). Metro: measuring error on simplified surfaces. *Computer graphics forum*, *17*(2), 167–174.

Clark, J., & Robson, S. (2004). Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surfaces of known colour. *Survey Review*, *37*(294), 626–638. https://doi.org/10.1179/sre.2004.37.294.626

CloudCompare. (2022). *CloudCompare - 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project* (Version 2.13.alpha). https://www.cloudcompare.org/

Crameri, F. (2021). *Scientific colour maps* (Version 7.0.1). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.5501399

Czerwonka-Schröder, D., Anders, K., & Winiwarter, L. (2023). Die permanente dreidimensionale Datenerfassung alpiner Hangrutschungen – Multitemporale Datenanalyse in webbasierten Anwendungen. In T. Weinold (Hrsg.), *22. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2023* (S. 34–45). Wichmann.

De Wekker, S. F. J., & Kossmann, M. (2015). Convective Boundary Layer Heights Over Mountainous Terrain—A Review of Concepts. *Frontiers in Earth Science*, *3*. https://doi.org/10.3389/feart.2015.00077

Deruyter, G., Sloover, L. D., Verbeugt, J., Wulf, A. D., & Vos, S. (2020). Macrotidal Beach Monitoring (Belgium) using Hypertemporal Terrestrial Lidar. *Proceedings of the FIG Working Week 2020*.

de Wit, J., Gillon, M., Demory, B.-O., & Seager, S. (2012). Towards consistent mapping of distant worlds: secondary-eclipse scanning of the exoplanet HD733b. *A&A*, *548*, A128. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219060

DGGT & DVW. (2022). *Empfehlungen des Arbeitskreises Geomesstechnik* (J. Gattermann, Hrsg.). Wilhelm Ernst und Sohn.

DIN 820-1:2014-06. (2014). Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). Normungsarbeit - Teil 1: Grundsätze.

DIN EN ISO 16484-2:2004-10. (2004). Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). Systeme der Gebäudeautomation (GA) Teil 2: Hardware (ISO 164842:2004); Deutsche Fassung EN ISO 164842:2004.

DIN ISO 31000:2018-10. (2018). Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). Risikomanagement – Leitlinien (ISO 31000:2018).

Dinkel, A., Hoegner, L., Emmert, A., Raffl, L., Wunderlich, T., & Stilla, U. (2021). Gemeinsame Auswertung von geodätischen und photogrammetrischen Punktwolken zum Monitoring hochalpiner, gravitativer Massenbewegungen. In T. Weinold (Hrsg.), *21. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2021* (S. 13–23). Wichmann.

DMV. (2009). Deutscher Markscheider-Verein e.V., Arbeitsgruppe Laserscanning (Hrsg.). Grundsätze zum Einsatz von luftgestützten und terrestrischen Laserscanneraufnahmen im Bergbau. Stand: 14.04.2008. Ausgabe: 13.11.2009.

Dobrinski, P., Krakau, G., & Vogel, A. (2010). *Physik für Ingenieure* (Bd. 12). Springer.

Dold, C., & Brenner, C. (2006). Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives 36 (2006)*, *36*, 78–83.

DVW. (2014). DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. (Hrsg.). DVW-Merkblatt 7-2014: Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). Stand: 08.05.2014. Ausgabe: 16.05.2014.

Dziak, J. J., Coffman, D. L., Lanza, S. T., Li, R., & Jermiin, L. S. (2019). Sensitivity and specificity of information criteria. *Briefings in Bioinformatics*, *21*(2), 553–565. https://doi.org/10.1093/bib/bbz016

Eichhorn, A. (2012). Monitoring: ein grundlegender Beitrag zur Überwachung von Bauwerken. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *119*(4), 123–131.

Eichhorn, A. (2014). Ursache und Wirkung bei Deformationsprozessen – analytische und numerische Ansätze. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *121*(10), 123–131.

Eichhorn, A., Heunecke, O., Kuhlmann, H., & Neuner, H. (2017). Methoden und Modelle bei ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen. In W. Freeden, R. Rummel & W. Schwarz (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie* (S. 507–538). Springer.

Eitel, J. U., Höfle, B., Vierling, L. A., Abellán, A., Asner, G. P., Deems, J. S., Glennie, C. L., Joerg, P. C., LeWinter, A. L., Magney, T. S., Mandlburger, G., Morton, D. C., Müller, J., & Vierling, K. T. (2016). Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sensing of Environment*, *186*, 372–392. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.018

Eling, D. (2009). *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung, Reihe C (641), Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* [Diss.].

Erdélyi, J., Kopáčik, A., Lipták, I., & Kyrinovič, P. (2017). Automation of point cloud processing to increase the deformation monitoring accuracy. *Applied Geomatics*, *9*(2), 105–113.

Eschelbach, C. (2009). *Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und Wärmeflusses in der Rauhigkeitsschicht, Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik (2009,1), Universität Karlsruhe (TH)* [Diss.].

Fey, C., & Wichmann, V. (2017). Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain–handling uncertainties. *Earth Surface Processes and Landforms*, *42*(5), 789–802.

Foken, T. (2016). *Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden*. Springer Spektrum.

Förstner, W., & Khoshelham, K. (2017). Efficient and Accurate Registration of Point Clouds with Plane to Plane Correspondences. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 2165–2173. https://doi.org/10.1109/ICCVW.2017.253

Fowler, A., & Geier, A. (2015). Field test of long range terrestrial laser scanner and ground-based synthetic aperture radar for area monitoring in open pit mines. In P. Dight (Hrsg.), *FMGM 2015: Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics* (S. 797–808). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1508_59_Fowler

Friedli, E. (2020). *Point Cloud Registration and Mitigation of Refraction Effects for Geomonitoring Using Long-Range Terrestrial Laser Scanning, ETH Zurich* [Diss.].

Friedli, E., Presl, R., & Wieser, A. (2019). Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In *Proc. of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.

Friedli, E., & Wieser, A. (2016). Identification of stable surfaces within point clouds for areal deformation monitoring. In *Proc. of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.

Frukacz, M., Presl, R., Wieser, A., & Favot, D. (2017). Pushing the sensitivity limits of RTS-based continuous deformation monitoring of an alpine valley. *Applied Geomatics*, *9*(2), 81–92.

Fulcher, B. D. (2017). Feature-based time-series analysis. *CoRR*, *abs/1709.08055*.

Fulcher, B. D., & Jones, N. S. (2014). Highly comparative, feature-based time-series classification. *CoRR*, *abs/1401.3531*.

Fulcher, B. D., Little, M. A., & Jones, N. S. (2013). Highly comparative time-series analysis: The empirical structure of time series and their methods. *CoRR*, *abs/1304.1209*.

Gabler. (2022). *Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Organisation*. Verfügbar 3. Dezember 2022 unter https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/organisation-51971/version-275122

Gaisecker, T., & Schröder, D. (2022). *WHITE PAPER: RIEGL V-Line Scanners for Permanent Monitoring Applications and integration capabilities into customers risk management*. Horn und Essen, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH & DMT GmbH & Co. KG.

Gaisecker, T., Pfennigbauer, M., Sevcik, C., & Studnicka, N. (2012). Terrestrisches Laser Scanning in den Alpen mit dem RIEGL VZ-4000 - für Geländeerfassung, Hangrutschungsüberwachung und Gletschermonitoring. *Vermessung- und Geoinformation*, *1*.

GDAL/OGR contributors. (2022). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library* (Version 3.6.1). https://gdal.org

Geier, A., & Martienßen, T. (2017). RIEGL VZ-4000 – Was bleibt da auf der Strecke? *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik-Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*.

Geiger, R. (1942). *Das Klima der bodennahen Luftschicht: ein Lehrbuch der Mikroklimatologie* (Bd. 78). Springer-Verlag.

Gielsdorf, F., Gründig, L., & Milev, I. (2008). Deformation analysis with 3D laser scanning. *Proceedings of the 13th FIG Symposium*, 12–15.

Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., & Thibault, G. (2005). Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *36*(3), W19.

Glickman, T. (2000). *Glossary of meteorology*. American Meteorological Society.

Gojcic, Z., Zhou, C., & Wieser, A. (2020). F2S3: Robustified determination of 3D displacement vector fields using deep learning. *Journal of Applied Geodesy*, *14*(2), 177–189. https://doi.org/doi:10.1515/jag-2019-0044

Gordon, B. (2008). *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner, Technische Universität Darmstadt* [Diss.].

Gottwald, R., Heister, H., & Staiger, R. (2009). Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern - eine Standortbestimmung. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, *134*(2), 88–96.

Gruen, A., & Akca, D. (2005). Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *59*(3), 151–174. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.02.006

Harmening, C., & Neuner, H. (2020). A spatio-temporal deformation model for laser scanning point clouds. *Journal of Geodesy*, *94*(2), Artikel 26, 26. https://doi.org/10.1007/s00190-020-01352-0

Hartl, S. (2019). *Analyse der Felslawinen Frank Slide und Vals mit Hilfe des Computercodes r.avaflow [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]*. https://doi.org/10.34726/hss.2019.69060

Hartzell, P. J., Gadomski, P. J., Glennie, C. L., Finnegan, D. C., & Deems, J. S. (2015). Rigorous error propagation for terrestrial laser scanning with application

to snow volume uncertainty. *Journal of Glaciology*, *61*(230), 1147–1158. https://doi.org/10.3189/2015JoG15J031

Helmert, F. R. (1880). *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. Einleitung und I. Teil: Die mathematischen Theorien*. B. G. Teubner.

Hennes, M. (2002). Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. *FuB - Flächenmanagement und Bodenordnung*, *64*(2), 73–86.

Hennes, M., & Heister, H. (2007). Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, (11-12), 375–383.

Hennes, M. (2006). Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, (3), 85–94.

Heunecke, O. (2014). Möglichkeiten der Erfassung von unstetigen Deformationen in Raum und Zeit. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *121*(4), 149–155.

Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., & Neuner, H. (2013). *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen* (M. Möser, G. Müller & H. Schlemmer, Hrsg.). Wichmann.

Heunecke, O., & Niemeier, W. (2004). Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen: Herausforderungen, Konzepte, Trends. In *Ingenieurvermessung 2004, 14th International Course on Engineering Surveying* (S. 131–142). ETH Zürich.

Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B., & Sternberg, H. (2010). Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *115*(D21). https://doi.org/10.1029/2010JD014067

Höfle, B., Canli, E., Schmitz, E., Crommelinck, S., Hoffmeister, D., & Glade, T. (2016). 4D Near Real-Time Environmental Monitoring Using Highly Temporal LiDAR. In *Geophysical Research Abstracts - EGU General Assembly 2016* (S. 4006–4009). https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947364

Holst, C., Dupuis, J., Paulus, S., & Kuhlmann, H. (2014). Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern – eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *121*(7), 260–272.

Holst, C., Janßen, J., Schmitz, B., Blome, M., Dercks, M., Schoch-Baumann, A., Blöthe, J., Schrott, L., Kuhlmann, H., & Medic, T. (2021). Increasing Spatio-Temporal Resolution for Monitoring Alpine Solifluction Using Terrestrial Laser Scanners and 3D Vector Fields. *Remote Sensing*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/rs13061192

Holst, C., Klingbeil, L., Esser, F., & Kuhlmann, H. (2017a). Using point cloud comparisons for revealing deformations of natural and artificial objects. In *INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying* (S. 265–274).

Holst, C., & Kuhlmann, H. (2016). Challenges and present fields of action at laser scanner based deformation analyses. *Journal of Applied Geodesy*, *10*(1), 17–25. https://doi.org/10.1515/jag-2015-0025

Holst, C., Medić, T., & Kuhlmann, H. (2018). Dealing with systematic laser scanner errors due to misalignment at area-based deformation analyses. *Journal of Applied Geodesy*, *12*(2), 169–185. https://doi.org/10.1515/jag-2017-0044

Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., & Kuhlmann, H. (2016). Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *123*(6), 147–157.

Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichborn, M., & Kuhlmann, H. (2015). Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, *9*(1), 1–13. https://doi.org/10.1515/jag-2014-0018

Holst, C., Schmitz, B., Schraven, A., & Kuhlmann, H. (2017b). Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, *142*(2), 98–110.

Hübner, E. (1977). Einfluss der terrestrischen Refraktion auf den Laserstrahl in bodennahen Luftschichten. *Vermessungstechnik*, *25*(10), 349–353.

Huggel, C., Clague, J. J., & Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, *37*(1), 77–91. https://doi.org/10.1002/esp.2223

Hungerland, F., Quitzau, J., Zuber, C., Ehrlich, L., Growitsch, C., Rische, M.-C., Schlitte, F., & Haß, H.-J. (2015). *Digitalökonomie* (Strategie 2030 - Vermögen und Leben in der nächsten Generation Nr. 21). Hamburg, Berenberg Bank und Hamburgisches WeltWirtschaftsInstitut (HWWI). http://hdl.handle.net/10419/121321

IAG. (1999). *IAG Resolutions adopted at the XXIIth General Assembly in Birmingham*. Verfügbar 7. Dezember 2022 unter https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fda0c032.pdf

Ingensand, H. (2008). Concepts and solutions to overcome the refraction problem in terrestrial precision measurement. *Geod. Kartogr*, *34*(2), 61–65.

Ioannidis, C., & Valani, A. (2006). 3D model generation for deformation analysis using laser scanning data of a cooling tower. *Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG Symposium*.

Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means [Award winning papers from the 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)]. *Pattern Recognition Letters*, *31*(8), 651–666. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011

Joeckel, R., Stober, M., & Huep, W. (2008). *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Wichmann.

Jutzi, B., & Stilla, U. (2003). Laser pulse analysis for reconstruction and classification of urban objects. *The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, *34*(3W8), 151–156.

Kabashi, I. (2003). *Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen, TU Wien* [Diss.].

Kaufman, L., & Rousseeuw, P. (1990). *Finding Groups in Data: An Introduction To Cluster Analysis*. https://doi.org/10.2307/2532178

Kauker, S., & Schwieger, V. (2017). A synthetic covariance matrix for monitoring by terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, *11*(2), 77–87. https://doi.org/10.1515/jag-2016-0026

Keogh, E., & Kasetty, S. (2003). On the Need for Time Series Data Mining Benchmarks: A Survey and Empirical Demonstration. *Data Mining and Knowledge Discovery*, *7*(4), 349–371. https://doi.org/10.1023/A:1024988512476

Kerekes, G., & Schwieger, V. (2020). Elementary error model applied to terrestrial laser scanning measurements: Study case arch dam kops. *Mathematics*, *8*(4), 593.

Kermarrec, G., Skytt, V., & Dokken, T. (2022a). Surface approximation of coastal regions: LR B-Spline for detection of deformation pattern. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *V-2-2022*, 119–126. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2022-119-2022

Kermarrec, G., Skytt, V., & Dokken, T. (2023). Adaptive Surface Fitting with Local Refinement: LR B-Spline Surfaces. In *Optimal Surface Fitting of Point Clouds Using Local Refinement: Application to GIS Data* (S. 23–39). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16954-0_3

Kermarrec, G., Yang, Z., & Czerwonka-Schröder, D. (2022b). Classification of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds: A Comparison of Methods for Landslide Monitoring from Mathematical Surface Approximation. *Remote Sensing*, *14*(20). https://doi.org/10.3390/rs14205099

Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Nr. 19* [Diss.].

Kersten, T. P., Mechelke, K., Lindstaedt, M., & Sternberg, H. (2009). Methods for geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems. *Photogramm. Fernerkund. Geoinf*, *2009*, 301–315.

Kharaghani, G. (1987). *Propagation of refraction errors in trigonometric height traversing and geodetic levelling, TECHNICAL REPORT NO. 132, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick*. Verfügbar 7. Dezember 2022 unter https://gge.ext.unb.ca/Pubs/TR132.pdf

Kromer, R. A., Abellán, A., Hutchinson, D. J., Lato, M., Chanut, M.-A., Dubois, L., & Jaboyedoff, M. (2017). Automated terrestrial laser scanning with near-real-time change detection – monitoring of the Séchilienne landslide. *Earth Surface Dynamics*, *5*(2), 293–310. https://doi.org/10.5194/esurf-5-293-2017

Kromer, R. A., Abellán, A., Hutchinson, D. J., Lato, M., Edwards, T., & Jaboyedoff, M. (2015). A 4D Filtering and Calibration Technique for Small-Scale Point Cloud Change Detection with a Terrestrial Laser Scanner. *Remote Sensing*, *7*(10), 13029–13052. https://doi.org/10.3390/rs71013029

Kuchling, H. (2022). *Taschenbuch der Physik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

Kuhlmann, H., & Holst, C. (2017). Flächenhafte Abtastungmit Laserscanning - Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In W. Freeden, R. Rummel & W. Schwarz (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie* (S. 167–212). Springer.

Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., & Niemeier, W. (2013). Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, *138*(6), 391–399.

Kukuvec, A. (2010). *Vertikaler Refraktionseffekt – Messung und Anwendung (Masterarbeit an der TU Graz)*. Verfügbar 7. Dezember 2022 unter https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a719fdb1b7&location=browse

Kulkarni, S., & Desai, S. (2017). Classification of gamma-ray burst durations using robust model-comparison techniques. *Astrophysics and Space Science*, *362*(4). https://doi.org/10.1007/s10509-017-3047-6

Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Lodder, Q., Brand, E., & Vos, S. (2022). Detecting anthropogenic volume changes in cross sections of a sandy beach with permanent laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B2-2022*, 1055–1061. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1055-2022

Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., & Vos, S. (2021a). Coastal change patterns from time series clustering of permanent laser scan data. *Earth Surface Dynamics*, *9*(1), 89–103. https://doi.org/10.5194/esurf-9-89-2021

Kuschnerus, M., Schröder, D., & Lindenbergh, R. (2021b). Environmental influences on the stability of a permanently installed laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *43*(B2-2021).

Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., de Vries, S., & Vos, S. (2021c). *Workshop on Error Sources and Corrections in Permanent Laser Scanning*. Verfügbar 2. Dezember 2022 unter https://coastscan.citg.tudelft.nl/index.php/workshop-on-error-sources-and-corrections-in-permanent-laser-scanning/

Labbe, R. (2020). *Kalman and Bayesian Filters in Python*. Verfügbar 19. Dezember 2022 unter http://rlabbe.github.io/Kalman-and-Bayesian-Filters-in-Python/

Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *82*, 10–26. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009

Laufer, R. (2011). *Prozedurale Qualitätsmodellierung und -management für Daten –ingenieurtechnische und verkehrstechnische Anwendungen-, Universität Stuttgart* [Diss.].

Leitner, P. (2018). Ein Riesenschreck für das Valsertal. *TIROL.KOMMUNAL - Das offizielle Magazin des Tiroler Gemeindeverbandes*, (2), 6–9. Verfügbar 28. Januar 2023 unter https://www.gemeindeverband-tirol.at/uploads/Tirol_kommunal_02_2018/files/assets/basic-html/index.html

Leuschner, M. (2019). Was sind allgemein anerkannte Regeln der Technik? Welche Bedeutung haben sie und auf welche Probleme kann man dabei stoßen? *Der Bausachverständige*, *15*(4), 54–56.

Lichti, D. D., & Gordon, S. J. (2004). Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. *Proceedings of the FIG Working Week 2004*.

Lindenbergh, R., van der Kleij, S., Kuschnerus, M., Vos, S., & de Vries, S. (2019). Clustering time series of repeated scan data of sandy beaches. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2/W13*, 1039–1046. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1039-2019

Lindenbergh, R., & Pfeifer, N. (2005). A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In *7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*.

Little, M.-J. (2006). Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation. In *International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering* (S. 211–230). The South African Institute of Mining & Metallurgy.

Malberg, H. (2007). *Meteorologie und Klimatologie - Eine Einführung*. Springer.

Matzka, S. (2021). Unüberwachtes Lernen. In *Künstliche Intelligenz in den Ingenieurwissenschaften: Maschinelles Lernen verstehen und bewerten* (S. 171–197). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34641-6_5

Mayr, A., Rutzinger, M., Bremer, M., Oude Elberink, S., Stumpf, F., & Geitner, C. (2017). Object-based classification of terrestrial laser scanning point clouds for landslide monitoring. *The Photogrammetric Record*, *32*(160), 377–397.

Mechelke, K., Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2007). Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems. *Proc. in the Optical*, *3*, 19–327.

Medić, T. (2021). *Efficient calibration strategies for panoramic terrestrial laser scanners, Rheinische Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn* [Diss.].

Möser, M., Hoffmeister, H., Müller, G., Staiger, R., Schlemmer, H., & Wanninger, L. (2012). *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen* (M. Möser, G. Müller & H. Schlemmer, Hrsg.). Wichmann.

Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*, *49*(353), 99–116. https://doi.org/10.1080/00396265.2015.1133039

Müller, M., Schmenger, F., Schröder, D., & Zschiesche, K. (2016). Evaluierung des Laserscannings zur Deformationsanalyse an der Ennepetalsperre. *WASSERWIRTSCHAFT*, *106*(9), 10–14.

Neitzel, F. (2010). Ausgleichungsrechnung – Modellbildung, Auswertung, Qualitätsbeurteilung. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. DVW-Schriftenreihe, Band 61* (S. 95–127). Wißner-Verlag.

Neumann, I. (2009). *Zur Modellierung eines erweiterten Unsicherheitshaushaltes in Parameterschätzung und Hypothesentests, Reihe C (634), Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* [Diss.].

Neumann, I., & Alkhatib, H. (2019). Normen, Richtlinien und Merkblätter für die Qualitätssicherung in der Geodäsie. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2019. DVW-Schriftenreihe, Band 95* (S. 31–38). Wißner-Verlag.

Neumann, I., & Alkhatib, H. (2022). Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren – das Handwerkszeug. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022. DVW-Schriftenreihe, Band 101* (S. 9–11). Wißner-Verlag.

Neuner, H., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2016). Overview on Current Modelling Strategies of Point Clouds for Deformation Analysis. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *123*(11-12), 328–339.

Niemeier, W. (2008). *Ausgleichungsrechnung: Statistische Auswertemethoden.* De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110206784

Niemeier, W. (2011). Stand und Entwicklungstendenzen für das Geometrische Monitoring von kleinräumigen Objekten. In W. Busch, W. Niemeier & U. Sörgel (Hrsg.), *GeoMonitoring Tagung 2011* (S. 27–45). TU Clausthal.

Niemeier, W., & Riedel, B. (2017). Monitoring von Hangrutschungen. In W. Freeden, R. Rummel & W. Schwarz (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie* (S. 539–564). Springer.

Niemeier, W., & Tengen, D. (2020). Stochastic Properties of Confidence Ellipsoids after Least Squares Adjustment, Derived from GUM Analysis and Monte Carlo Simulations. *Mathematics*, *8*(8). https://doi.org/10.3390/math8081318

O'Dea, A., Brodie, K. L., & Hartzell, P. (2019). Continuous Coastal Monitoring with an Automated Terrestrial Lidar Scanner. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(2). https://doi.org/10.3390/jmse7020037

Ohlmann-Lauber, J., & Schäfer, T. (2011). Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Terrestrisches Laserscanning 2011 (TLS 2011 mit TLS-Challenge). DVW-Schriftenreihe, Band 66* (S. 147–157). Wißner-Verlag.

Paffenholz, J.-A. (2012). *Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors, Reihe C (689), Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* [Diss.].

Paffenholz, J.-A., Alkhatib, H., & Kutterer, H. (2010a). Direct geo-referencing of a static terrestrial laser scanner. *4*(3), 115–126. https://doi.org/10.1515/jag.2010.011

Paffenholz, J.-A., Horst, S., Alkhatib, H., & Kutterer, H. (2010b). On the tracking of a laser scanner for geo-referencing tasks by means of geodetic sensors. *2nd International Conference on Machine Control & Guidance-Proceedings*, 85–94.

Paffenholz, J.-A., Stenz, U., Wujanz, D., Neitzel, F., & Neumann, I. (2017). 3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 88* (S. 115–127). Wißner-Verlag.

Past, F. (1965). *Kritischer Vergleich der Refraktionsformeln für trigonometrische Höhenmessung und Versuch einer systematischen Ordnung, Reihe C (75), Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* [Diss.].

Patel, E., & Kushwaha, D. S. (2020). Clustering Cloud Workloads: K-Means vs Gaussian Mixture Model [Third International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet'19)]. *Procedia Computer Science*, *171*, 158–167. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.017

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*(85), 2825–2830. http://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html

Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., Casula, G., & Boschi, E. (2013). A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *79*, 185–198. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.021

Pfeifer, N., Mandlburger, G., Otepka, J., & Karel, W. (2014). OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, *45*, 125–136. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.11.002

Pfeifer, N., Dorninger, P., & Haring, A. (2007). Investigating Terrestrial Laser Scanning Intensity Data: Quality and Functional Relations. *Proceedings of the 8th International Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, 328–337.

Pfeiffer, J., Zieher, T., Bremer, M., Wichmann, V., & Rutzinger, M. (2018). Derivation of Three-Dimensional Displacement Vectors from Multi-Temporal Long-Range Terrestrial Laser Scanning at the Reissenschuh Landslide (Tyrol, Austria). *Remote Sensing*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/rs10111688

Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., & Scaioni, M. (2014). Scan registration using planar features. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, *45*.

Prokop, A., & Panholzer, H. (2009). Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*(6), 1921–1928. https://doi.org/10.5194/nhess-9-1921-2009

Raffl, L., & Holst, C. (2022). Including virtual target points from laser scanning into the point-wise rigorous deformation analysis at geo-monitoring applications. In *Proc. of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. https://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13844

rapidlasso. (2022). *LAStools* (Version 221128). https://rapidlasso.de/

Raschhofer, J., Kerekes, G., Harmening, C., Neuner, H., & Schwieger, V. (2021). Estimating Control Points for B-Spline Surfaces Using Fully Populated Synthetic Variance–Covariance Matrices for TLS Point Clouds. *Remote Sensing*, *13*(16). https://doi.org/10.3390/rs13163124

Rauch, H., Tung, F., & Striebel, C. (1965). Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems. *AIAA Journal*, *3*(8), 1445–1450. https://doi.org/10.2514/3.3166

Reiterer, A. (2012). Modeling Atmospheric Refraction Inuences by Optical Turbulences Using an Image-Assisted Total Station. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, *137*(3), 156–165.

Reshetyuk, Y. (2006). *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners, Royal Institute of Technology (KTH Stockholm)* [Diss.].

Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning, Royal Institute of Technology (KTH Stockholm)* [Diss.].

Resnik, B. (2021). Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen bei der Auswertung von Deformationsmessungen. In T. Weinold (Hrsg.), *21. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2021* (S. 150–162). Wichmann.

RIEGL. (2022). *Datasheet RIEGL VZ-2000i*. Verfügbar 5. Dezember 2022 unter http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VZ-2000i_Datasheet_2022-09-27.pdf

Rietdorf, A. (2005). *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip, Reihe C (582), Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* [Diss.].

Rietdorf, A., Gielsdorf, F., & Alder, J. (2004). Konzept zur Kalibrierung von scannenden Messinstrumenten. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik-Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*, 64–71.

Rüeger, J. (1990). *Electric Distance Measurement - An Introduction*. Springer-Verlag.

Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 145–152. https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423

Scaioni, M. (2012). On the estimation of rigid-body transformation for TLS registration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXIX-B5*, 601–606. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-601-2012

Schäfer, T. (2017). *Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche, TU München* [Diss.].

Schröder, D., Anders, K., Winiwarter, L., & Wujanz, D. (2022). Permanent terrestrial LiDAR monitoring in mining, natural hazard prevention and infrastructure protection – Chances, risks, and challenges: A case study of a rockfall in Tyrol, Austria. In *Proc. of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. https://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13649

Schröder, D., & Klonowski, J. (2019). i²mon - integrated monitoring for the detection of ground and surface displacements caused by coal mining. In *Proc. of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.

Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 461–464.

Schwarz, W. (2020). Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM – Teil 1. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *127*(2), 69–86.

Schwarz, W., & Hennes, M. (2017). Qualitätsbewertungen in der Ingenieurgeodäsie. In W. Freeden, R. Rummel & W. Schwarz (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie* (S. 371–402). Springer.

Serafin, S., Adler, B., Cuxart, J., De Wekker, S. F. J., Gohm, A., Grisogono, B., Kalthoff, N., Kirshbaum, D. J., Rotach, M. W., Schmidli, J., Stiperski, I., Večenaj, Ž., & Zardi, D. (2018). Exchange Processes in the Atmospheric Boundary Layer Over Mountainous Terrain. *Atmosphere*, *9*(3). https://doi.org/10.3390/atmos9030102

Serantoni, E., & Wieser, A. (2016). TLS-based Deformation Monitoring of Snow Structures. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). DVW-Schriftenreihe, Band 85* (S. 115–127). Wißner-Verlag.

Shi, W., & Zeng, W. (2013). Genetic k-Means Clustering Approach for Mapping Human Vulnerability to Chemical Hazards in the Industrialized City: A Case Study of Shanghai, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *10*(6), 2578–2595. https://doi.org/10.3390/ijerph10062578

Sommer, K.-D., & Siebert, B. R. L. (2004). Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. *tm - Technisches Messen*, *71*(2), 52–66. https://doi.org/10.1524/teme.71.2.52.27068

Soudarissanane, S. (2016). *The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry, TU Delft* [Diss.].

Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *66*(4), 389–399. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005

Soudarissanane, S., Van Ree, J., Bucksch, A., & Lindenbergh, R. (2007). Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality. *Proceedings 3D-NordOst*, 1–8.

Staiger, R. (2005). The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS). *Proceedings of the FIG Working Week 2005*.

Staiger, R., & Ettel, M. (2003). Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich. In E. Seyfert (Hrsg.), *23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF* (S. 293–300). Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF).

Stober, M. (1995). Untersuchungen zum Refraktionseinfluss bei der trigonometrischen Höhenmessung auf dem grönländischen Inlandeis. *Festschrift für Heinz Draheim, Eugen Kuntz und Hermann Mälzer, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe*, 259–272.

Studnicka, N., & Effkemann, C. (2019). Vollautomatische TLS-Datenregistrierung in der Praxis – Vermessung eines Parkhauses in Fulda. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019). DVW-Schriftenreihe, Band 96* (S. 107–118). Wißner-Verlag.

Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). *Introduction to data mining*. Pearson Education.

Tavenard, R., Faouzi, J., Vandewiele, G., Divo, F., Androz, G., Holtz, C., Payne, M., Yurchak, R., Rußwurm, M., Kolar, K., & Woods, E. (2020). Tslearn, A Machine Learning Toolkit for Time Series Data. *Journal of Machine Learning Research*, *21*(118), 1–6. http://jmlr.org/papers/v21/20-091.html

Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., & Genevois, R. (2007). Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, *28*(16), 3425–3446.

Theiler, P. W., Wegner, J. D., & Schindler, K. (2014). Keypoint-based 4-Points Congruent Sets – Automated marker-less registration of laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *96*, 149–163. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.06.015

Tschirschwitz, F., Mechelke, K., Jansch, H., Uliczka, K., & Kersten, T. (2016). Ein automatisches Monitoringsystem für Buhnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, *141*(5), 297–305.

Ullrich, A., & Pfennigbauer, M. (2011). Echo Digitization and Waveform Analysis in Airborne and Terrestrial Laser Scanning. In D. Fritsch (Hrsg.), *Photogrammetric Week '11* (S. 217–228). Wichmann.

Ullrich, A., & Fürst, C. (2017). Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. In *DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. [Hrsg.]. Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 88* (S. 145–154). Wißner-Verlag.

Vezočnik, R., Ambrožič, T., Sterle, O., Bilban, G., Pfeifer, N., & Stopar, B. (2009). Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, *9*(12), 9873–9895. https://doi.org/10.3390/s91209873

Voordendag, A. B., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., & Kaser, G. (2021). Automated and Permanent Long-Range Terrestrial Laser Scanning in a High Mountain Environment: Setup and First Results. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *V-2-2021*, 153–160. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2021-153-2021

Voordendag, A. B., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., & Kaser, G. (2022). The Stability of a Permanent Terrestrial Laser Scanning System - a Case Study with Hourly Scans. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B2-2022*, 1093–1099. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1093-2022

Vos, S., Anders, K., Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Höfle, B., Aarninkhof, S., & de Vries, S. (2022). A high-resolution 4D terrestrial laser scan dataset of the Kijkduin beach-dune system, The Netherlands. *Scientific Data*, *9*(1), 1–11.

Vos, S., Kuschnerus, M., & Lindenbergh, R. (2020). Assessing the error budget for permanent laser scanning in coastal Areas. *Proceedings of the FIG Working Week 2020*.

Vos, S., Lindenbergh, R., de Vries, S., Aagaard, T., Deigaard, R., & Fuhrman, D. (2017). Coastscan: Continuous monitoring of coastal change using terrestrial laser scanning. *Proceedings of Coastal Dynamics*, *2017*, 115.

Vosselman, G., & Maas, H. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC Press.

Vosselman, G., Gorte, B. G., Sithole, G., & Rabbani, T. (2004). Recognising structure in laser scanner point clouds. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, *46*(8), 33–38.

Vrieze, S. I. (2012). Model selection and psychological theory: a discussion of the differences between the Akaike information criterion (AIC) and the Bayesian information criterion (BIC). *Psychological methods*, *17*(2), 228.

Wa2. (2021). *Wa2 - GNSS-Basislinien-Prozessor* (Version v2.1). http://www.wasoft.de/wa2/index.html

Whiteman, C. D. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780195132717.001.0001

Wieser, A., Kuhlmann, H., Schwieger, V., & Niemeier, W. (2017). Ingenieurgeodäsie – eine Einführung. In W. Freeden, R. Rummel & W. Schwarz (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie* (S. 1–22). Springer.

Wilkinson, B. E., Mohamed, A. H., Dewitt, B. A., & Seedahmed, G. H. (2010). A novel approach to terrestrial LiDAR georeferencing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *76*(6), 683–690.

Williams, J. G., Rosser, N. J., Hardy, R. J., Brain, M. J., & Afana, A. A. (2018). Optimising 4-D surface change detection: an approach for capturing rockfall

magnitude–frequency. *Earth Surface Dynamics*, *6*(1), 101–119. https://doi.org/10.5194/esurf-6-101-2018

Williams, J. G. (2017). *Insights into Rockfall from Constant 4D Monitoring, Durham University* [Diss.].

Williams, J. G., Rosser, N. J., Hardy, R. J., & Brain, M. J. (2019). The Importance of Monitoring Interval for Rockfall Magnitude-Frequency Estimation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *124*(12), 2841–2853. https://doi.org/10.1029/2019JF005225

Wiltschko, T. (2004). *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten, Universität Stuttgart* [Diss.].

Wiltschko, T., & Kaufmann, T. (2005). Modellierung und Bewertung der Qualität in Prozessen der Geodatenverarbeitung am Beispiel von Straßendaten. In J. Strobl, T. Blaschke & G. Griesebner (Hrsg.), *Angewandte Geoinformatik. XVII Beiträge zum AGIT-Symposium 2005* (S. 790–799). Wichmann.

Winiwarter, L., Anders, K., Schröder, D., & Höfle, B. (2022a). Full 4D Change Analysis of Topographic Point Cloud Time Series using Kalman Filtering. *Earth Surface Dynamics Discussions*, *2022*, 1–25. https://doi.org/10.5194/esurf-2021-103

Winiwarter, L., Anders, K., Wujanz, D., & Höfle, B. (2020). Influence of Ranging Uncertainty of Terrestrial Laser Scanning on Change Detection in Topographic 3d Point Clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *V-2-2020*, 789–796. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-789-2020

Winiwarter, L., Anders, K., & Höfle, B. (2021). M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *178*, 240–258. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.011

Winiwarter, L., Esmorís Pena, A. M., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sánchez, J., Searle, M., & Höfle, B. (2022b). Virtual laser scanning with HELIOS++: A novel take on ray tracing-based simulation of topographic full-waveform 3D laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, *269*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112772

Wolf, H. (1975). *Ausgleichungsrechnung: Formeln zur praktischen Anwendung*. Dümmler.

Woschitz, H., & Heister, H. (2017). Ingenieurgeodäsie – eine Einführung. In W. Freeden, R. Rummel & W. Schwarz (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie* (S. 403–461). Springer.

Wujanz, D. (2012). Towards Transparent Quality Measures in Surface Based Registration Processes: Effects of Deformation onto Commercial and Scientific Implementations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *39*, B5.

Wujanz, D. (2016). *Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring, Reihe C (775), Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* [Diss.].

Wujanz, D., Avian, M., Krueger, D., & Neitzel, F. (2018a). Identification of stable areas in unreferenced laser scans for automated geomorphometric monitoring. *Earth Surface Dynamics*, *6*(2), 303–317. https://doi.org/10.5194/esurf-6-303-2018

Wujanz, D., Barazzetti, L., Previtali, M., & Scaioni, M. (2019). A Comparative Study among Three Registration Algorithms: Performance, Quality Assurance and Accuracy. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, *XLII-2/W9*, 779–786. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-779-2019

Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., & Neitzel, F. (2017). An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *125*, 146–155. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006

Wujanz, D., Krueger, D., & Neitzel, F. (2014a). Der ICProx-Algorithmus – oberflächenbasierte Registrierung terrestrischer Laserscans für die Deformationsanalyse. In A. Wieser (Hrsg.), *Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs* (S. 245–256). Wichmann.

Wujanz, D., Schaller, S., Gielsdorf, F., & Gründig, L. (2018b). Plane-Based Registration of Several Thousand Laser Scans on Standard Hardware. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, *42*(2).

Wujanz, D. (2018). Identifizierung von statistisch signifikanten Deformationen in multitemporalen Laserscans unter Berücksichtigung eines erweiterten Fehlerhaushaltes. *Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage.*

Wujanz, D., Burger, M., Tschirschwitz, F., Nietzschmann, T., Neitzel, F., & Kersten, T. P. (2018c). Determination of Intensity-Based Stochastic Models for Terrestrial Laser Scanners Utilising 3D-Point Clouds. *Sensors*, *18*(7). https://doi.org/10.3390/s18072187

Wujanz, D., Krueger, D., & Neitzel, F. (2016). Identification of stable areas in unreferenced laser scans for deformation measurement. *The Photogrammetric Record*, *31*(155), 261–280.

Wujanz, D., Krueger, D., Neitzel, F., & Manthe, C. (2014b). DefoScan++: Oberflächenbasierte Registrierung terrestrischer Laserscans für die Deformationsanalyse. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *121*(1), 13–21.

Wunderlich, T. (1985). *Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, TU Wien* [Diss.].

Wunderlich, T. (2006). Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit. *Vermessung & Geoinformation*, *94*(1-2), 50–62.

Wunderlich, T., Niemeier, W., Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., & Kuhlmann, H. (2016). Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – The Challenge. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *123*(11-12), 340–351.

Wunderlich, T., Raffl, L., & Wiedemann, W. (2019). Wiedererkennung – zwei Lösungen für die strenge Deformationsanalyse flächenhafter Beobachtungen der Ingenieurgeodäsie. In K. Hanke & T. Weinold (Hrsg.), *20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019* (S. 264–273). Wichmann.

Wunderlich, T., Raffl, L., & Wiedemann, W. (2020). Creating Identities – Two Solutions for Rigorous Deformation Analysis of Areal Observations in Engineering Geodesy. *AVN. Allgemeine Vermessungsnachrichten*, *127*(2), 61–68.

Yang, Y., & Schwieger, V. (2022). Supervoxel-based targetless registration and identification of stable areas for deformed point clouds. *Journal of Applied Geodesy.* https://doi.org/10.1515/jag-2022-0031

Yang, Z., Abbasi, I. A., Mustafa, E. E., Ali, S., & Zhang, M. (2021). An anomaly detection algorithm selection service for IoT stream data based on tsfresh tool and genetic algorithm. *Security and Communication Networks*. https://doi.org/10.1155/2021/6677027

Zámečníková, M., Wieser, A., Woschitz, H., & Ressl, C. (2014). Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, *8*(4), 311–326. https://doi.org/10.1515/jag-2014-0016

Zardi, D., & Whiteman, C. D. (2013). Diurnal Mountain Wind Systems. In F. K. Chow, S. F. De Wekker & B. J. Snyder (Hrsg.), *Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges* (S. 35–119). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4098-3_2

Zogg, H.-M. (2008). *Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System, ETH Zurich* [Diss.].

Zogg, H.-M., & Ingensand, H. (2008). Terrestrial laser scanning for deformation monitoring: Load tests on the Felsenau Viaduct (CH). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *37*(B5), 555–562.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Monitoring als Teil eines Risikomanagements nach DIN ISO 31000 und Zuordnung von Subdisziplinen. 10
2.2. Grundsätze zu den Eigenschaften eines wirksamen und effizienten Risikomanagements. 11
2.3. Darstellung des Risikomanagementprozess für eine Hangrutschung u.a. als systematische Anwendung von Grundsätzen. 12
2.4. Arbeitsschritte zur Ermittlung von Messunsicherheiten nach dem GUM. 13
2.5. Koordinatensystem des TLS ausgedrückt im SOCS. 18
2.6. Grafische Darstellung des Impulslaufzeitverfahrens. 20
2.7. Interaktion eines ausgesendeten Messstrahls mit verschiedenen Objekten. 21
2.8. Wellenformanalyse mittels «Full waveform data». 21
2.9. Registrierung und Georeferenzierung multitemporaler Punktwolken. . . 27
2.10. Einfluss der vertikalen Refraktion. 35
2.11. Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht. 36

4.1. Arbeitsablauf zur Integration von PLS in webbasierte Anwendungen. . 46

5.1. Noordwijk: Darstellung der Residuen auf dem Hubschrauberlandeplatz. 48
5.2. Noordwijk: Räumliche Darstellung der Messkonfiguration. 49
5.3. Noordwijk: Relative Ausrichtung der Neigungssensoren. 50
5.4. Noordwijk: Messwerte der internen Inklinometer. 54
5.5. Noordwijk: Berechnung der Ebene am Hubschrauberlandeplatz und Vergleich der Parameter mit den Wetterdaten. 56
5.6. Noordwijk: Vertikalwinkeländerung zwischen Container und der Horizontalen. 57
5.7. Detektion von Corner Cube Prismen aus den hochauflösenden Scandaten. 60
5.8. Räumliche Darstellung der Kalibrierbasis in Unna-Hemmerde. 62
5.9. Meteorologische Messwerte am 21.03.2022 an der Kalibrierbasis in Unna-Hemmerde. 66
5.10. Vals: Messergebnisse der Totalstation. 69
5.11. Vals: Dreidimensionale Darstellung des Testgebietes am Felssturz. . . . 70
5.12. Vals: Skizzierung eines Vertikalschnitts. 73
5.13. Vals: Draufsicht auf das Messgebiet. 73
5.14. Vals: Zeitreihen der Zenitwinkel (ϑ) der ausgewählten Prismen. 74
5.15. Vals: Skizzierung des technischen Aufbaus der Messeinrichtungen in der Schutzhütte. 75
5.16. Vals: Messwerte der Neigungssensorik an der Inklinometerplatte. 76
5.17. Vals: Vergleich der Zenitwinkeländerung an den Prismen. 77
5.18. Vals: Zeitreihen der korrigierten Zenitwinkeländerungen. 78
5.19. Vals: Zeitreihen der Zenitwinkeländerungen erfasst mittels Totalstation. 79
5.20. Vals: Meteorologische Daten an den Stationen im Messgebiet. 81

5.21. Vals: Differenz des Luftdrucks von «METEO04» und «METEO06» im Vergleich zu «METEO05». 82
5.22. Vals: Vergleichende Darstellung der Zenitwinkeländerung an Prisma «F1». 82
5.23. Vals: Vertikalschnitte entlang der Querprofile (Abb. 5.13) - Teil I. . . . 85
5.24. Vals: Vertikalschnitte entlang der Querprofile (Abb. 5.13) - Teil II. . . . 86
5.25. Vals: Der Vergleich verschiedener Registrierungsansätze multitemporaler Datensätze. 92
5.26. Vals: Der Vergleich verschiedener Registrierungsansätze als «Impact Map». 93

6.1. Bitemporaler Vergleich der Messszene im Valsertal. 98
6.2. Transformation der 3D-Punktdaten in eine rasterbasierte Repräsentation. 99
6.3. RGBA-codiertes Rasterbild. 100
6.4. Darstellung des formellen Zusammenhangs bei der Bildung von Streckendifferenzen zwischen zwei Messungen. 100
6.5. Workflow zur Extraktion von Zeitreihen aus 3D-Punktwolken. 101
6.6. Workflow zur Zeitreihensegmentierung mittels k-Means-Clustering. . . . 104
6.7. Kombinierte Betrachtung der beiden Auswahlkriterien - Summen der Abweichungsquadrate und Silhouettenkoeffizient. 104
6.8. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis (k=8). 105
6.9. Median der Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung (k=8). 106
6.10. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für k=14. 108
6.11. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für k=50. 108
6.12. Median der Zeitreihen von Klasse B. für k=14. 110
6.13. Median der Zeitreihen von Klasse B. für k=50. 110
6.14. Mittelwert der Zeitreihen von Klasse F. für k=50. 110
6.15. Kombinierte Betrachtung der beiden Auswahlkriterien - Summen der Abweichungsquadrate und Silhouettenkoeffizient - im räumlich reduzierten Bereich. 111
6.16. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis im limitierten Bereich für k=9. 112
6.17. Median aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung im limitierten Bereich (k=9). 112
6.18. Workflow zur Zeitreihensegmentierung mittels tsfresh und GMM. 114
6.19. BIC und AIC für verschiedene Modellberechnungen mittels GMM. . . . 115
6.20. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für 12 Cluster. . . . 116
6.21. Mittelwert der Zeitreihen von Klasse B. für 12 Cluster. 117
6.22. Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse C. (5) und D. (7) für 12 Cluster. 117
6.23. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis für 100 Cluster. . . 118
6.24. Mittelwert der Zeitreihen von Klasse B. für 100 Cluster. 119
6.25. Mittelwert der Zeitreihen von Klasse D. für 100 Cluster. 119
6.26. Standardabweichung der Zeitreihen von Klasse C. für 100 Cluster. . . . 119
6.27. BIC und AIC für verschiedene Modellberechnungen mittels GMM im limitierten Bereich. 120
6.28. Räumliche Darstellung des Segmentierungsergebnis im limitierten Bereich für 4 Cluster. 121
6.29. Mittelwert aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung im limitierten Bereich (4 Cluster). 121

6.30. Standardabweichung aller Zeitreihen als Ergebnis der Segmentierung im limitierten Bereich (4 Cluster). 122
6.31. Übersicht zu den ausgewählten Corepoints aus der 3D-Punktwolke im limitierten Bereich. 124
6.32. Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 1. 125
6.33. Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 2. 126
6.34. Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 3. 126
6.35. Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 4. 127
6.36. Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 5. 127
6.37. Ergebnisse der Kalman-Filterung an Corepoint 6. 128
6.38. Räumliche Übersicht der detektierten 4D-Änderungsobjekte. 131
6.39. Zusammenfassung der Zeitreihen von sechs ausgewählten 4D-Änderungsobjekte. 131

Abkürzungsverzeichnis

4D-OBC	engl. 4D objects-by-change - 4D-Änderungsobjekte
ABBergV	Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung)
AIC	Akaike Informationskriterium
ALS	engl. Airborne Laserscanning
BbergG	Bundesberggesetz
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BIC	Bayes'sche Informationskriterium
BVOBr	Bergverordnung für Braunkohlenbergwerke
DBSCAN	engl. Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DEM	engl. Digital Elevation Model
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPGA	engl. Dutch Permanent GNSS Array
DTW	engl. Dynamic Time Warping
DVW	Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.
EDM	Elektronische Distanzmessung
F2S3	engl. Feature to Feature Supervoxelbased Spatial Smoothing
FWA	engl. Full waveform data
GLCS	engl. Global Coordinate System
GMM	Gaußsche Mischmodelle
GNSS	engl. Global Navigation Satellite Systems
GUM	engl. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IAG	Internationale Assoziation der Geodäsie
ICP	engl. Iterative Closest Point
ICProx	engl. Iterative Closest Proximity
LiDAR	engl. Light Detection and Ranging
LR B-Splines	Lokal optimierte B-Splines
M	Mittelwert

M3C2	engl. Multiscale model-to-model cloud comparison
M3C2-EP	engl. Multiscale model-to-model cloud comparison with error propagation
MarkschBergV	Verordnung über die markscheiderischen Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche (Markscheider Bergverordnung)
MSA	engl. Multi Station Adjustment
NAS	Network Attached Storage
NURBS	Nicht-uniform rationale B-Splines
PCA	engl. Principal Component Analysis - Hauptkomponentenanalyse
PLS	Permanentes Laserscanning
PNG	engl. Portable Network Graphics (Raster-Grafikformat)
PRCS	engl. Project Coordinate System
RDB	engl. RIEGL Laser Scan Database
RGBA	Erweiterung des RGB-Farbraums um den Alphakanal (Transparenz je Pixel)
RMS	engl. Root Mean Square - Quadratisches Mittel
SD	Standardabweichung
SHM	engl. Structural Health Monitoring
SOCS	engl. Scanner's Own Coordinate System
TLS	Terrestrisches Laserscanning
TOF	engl. Time-of-flight
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UTC	engl. Coordinated Universal Time
VPN	engl. Virtual Private Network
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Tabellenverzeichnis

2.1. Zusammenspiel des Fehlschlusses 1. und 2. Art bei der Überprüfung von Null- und Alternativhypothese. 7
2.2. Qualitätsmerkmale für Informationen. 14
2.3. Publikationen betreffend multitemporaler Datenanalysen und permanenter Installationen terrestrischer Laserscanner. 23
2.4. Auswirkung der Unsicherheit der meteorologischen Eingangsgrößen. . . 32
2.5. Beiträge der einzelnen, vom Messplatz aus gezählten Strahlabschnitte an der dort beobachteten Refraktionsschwankung. 36

5.1. Noordwijk: Datenbasis und zugehörige Sensorik. 50
5.2. Noordwijk: Zusammenfassung der Kennzahlen der Referenzebenen. . . 52
5.3. Noordwijk: Trend, Periode und Residuen der jeweiligen Signale der Neigungsmessung. 53
5.4. Noordwijk: Pearson-Korrelationskoeffizient der Mittelwerte und Standardabweichungen der internen und externen Neigungswerte mit der Temperatur bzw. der Windgeschwindigkeit. 55
5.5. Sollstrecken und Höhendifferenzen der Kalibrierbasis Unna-Hemmerde. 61
5.6. Datenbasis und zugehörige Sensorik in Unna-Hemmerde. 63
5.7. Ergebnisse von der Genauigkeitsanalyse in Unna-Hemmerde. 65
5.8. Vals: Datenbasis und zugehörige Sensorik. 71
5.9. Vals: Länge der einzelnen Streckenabschnitte. 85

6.1. Interpretation des Silhouettenkoeffizienten. 103
6.2. Zusammenfassung der Ergebnisse für k=8 und aggregierte subjektive Klassifizierung. 105
6.3. Zusammenfassung der Ergebnisse für k=14 und aggregierte subjektive Klassifizierung. 109
6.4. Aggregierte subjektive Klassifizierung für k=50. 109
6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse im limitierten Bereich für k=9. . . . 112
6.6. Aggregierte Zusammenfassung der subjektiven Klassifizierung für die Modellberechnung mit 12 Clustern. 116
6.7. Aggregierte Zusammenfassung der subjektiven Klassifizierung für die Modellberechnung mit 100 Clustern. 118
6.8. Aggregierte Zusammenfassung der subjektiven Klassifizierung für die Modellberechnung mit 4 Clustern im limitierten Bereich. 122
6.9. Parametrisierung für die Berechnung des M3C2-EP-Algorithmus. 124
6.10. Vor- und Nachteile der eingesetzten Methoden zur Informationsextraktion aus multitemporalen Punktwolken. 134

Curriculum Vitae

Daniel Czerwonka-Schröder geb. Schröder

Geburtstag **11. November 1988**
Geburtsort **Hermeskeil**

Berufserfahrung

2016–2023 **Leitender Projektmanager Geomonitoring** DMT GmbH & Co. KG, Essen
2012–2015 **Vermessungsassistent** Vermessungsbüro Müller, Griesheim
2008–2009 **Sachbearbeitung** Siegenia-Aubi KG, Hermeskeil

Akademische Ausbildung

2014–2016 **Master of Science in Geoinformatik und Vermessung**
Hochschule Mainz
Masterarbeit: *Entwicklung und Evaluierung eines automatisierten GNSS-Monitoringsystems auf Grundlage von low-cost GNSS-Empfängern*

2011–2014 **Bachelor of Science in Geoinformatik und Vermessung**
Fachhochschule Mainz
Bachelorarbeit: *Überprüfung der Koordinatensystemlagerung von AXIO-NET im Vergleich zu SAPOS und vergleichende Untersuchungen von StarFire mit diesen GNSS-Diensten*

Schul- und Berufsausbildung

2010-2011 **Fachhochschulreife**
Geschwister-Scholl-Schule (BOS I), Hermeskeil

2005-2008 **Ausbildung zum Informatikkaufmann**
Siegenia-Aubi KG, Hermeskeil

1999-2005 **Mittlere Reife**
Erich Kästner Realschule, Hermeskeil