

Webbasierte Integration raumbezogener Massendaten – Bodenbewegungsmonitoring mittels Satellitenradar und TLS

Daniel Schröder, Karsten Zimmermann

EINLEITUNG UND MOTIVATION

Der vielbeschriebene Paradigmenwechsel nach /Niemeier & Heunecke 2004/ hat stattgefunden und in der Ingenieurgeodäsie zeichnet sich das durch einen Übergang von punktuellen, epochalen Messungen hin zu flächenhaften, kontinuierlichen Verfahren sowie der Entwicklung von zeitintensiven Offline-Auswertungen hin zu komplexen Online-Systemen aus. Um geometrische Veränderungen an einem Objekt signifikant erkennen zu können, war es bisher so, dass ein Messkonzept individuell an dieses angepasst werden musste. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Objekt entsprechend den zu erwartenden Verschiebungen räumlich als auch zeitlich diskretisiert wird. Die Qualität eines Monitoringkonzepts ist direkt abhängig von den Vorinformationen hinsichtlich eines Objektverhaltens. Es gibt also eine (scheinbar) genaue Kenntnis darüber, welche Bereiche zu überwachen sind. Dies kann jedoch zum Nachteil werden, wenn zeitlich als auch räumlich Veränderungen unbeobachtet bleiben.

Durch den Paradigmenwechsel haben sich die Möglichkeiten für Geodäten in der Erfassung von räumlich als auch zeitlich verdichteten Daten erheblich verbessert. Exemplarisch dafür haben sich das terrestrische Laserscanning (TLS) und die Radarinterferometrie in den letzten zwei Jahrzehnten als Messtechnik etabliert. Insbesondere der technische Fortschritt von TLS hin zu kommunikationsfähigen, programmierbaren Multisensorsystemen, einer kompakten und robusten Bauweise mit zunehmend hohen Reichweiten von wenigen Kilometern eröffnen neue Möglichkeiten der Anwendung. Der Laserscanner steht hier nicht als Substitut zu anderen Sensoren, sondern durch die ständige Weiterentwicklung und die damit verbundene Leistungsfähigkeit solcher Systeme besteht die Möglichkeit, Objekte permanent, autonom, zeitlich und räumlich hochauflösend messtechnisch zu erfassen. Permanente Laserscanningsysteme (PLS) sind im Sinne eines adaptiven Monitorings als weiterer Sensor für die Integration in echtzeitnahe Assistenz- oder Frühwarnsysteme prädestiniert. Wesentliche Vorteile von PLS im Vergleich zu Messungen zu ausgewählten Zeitpunkten und der Messung von Einzelpunkten sind zum einen Zeitreihen, die morphometrische Daten mit hoher zeitlicher Auflösung enthalten und ein tieferes Verständnis von Prozessen an der Erdoberfläche ermöglichen /Eitel et al. 2016/, und zum anderen das nicht mehr zwingende Erfordernis von zu erwartenden Bewegungsmerkmalen während des konzeptionellen Entwurfs. So ist es möglich, in der Frühphase eines Monitoringzyklus diverse Prozesse, wie beispielsweise Erosionen,

Rutschungen, Felsstürze oder Lawinen, mit nur einem Sensor zu erfassen /Winiwarter et al. 2022/, /Schröder et al. 2022/, /Schröder & Klonowski 2020/, /Gaisecker & Schröder 2022/.

Dem gegenüber steht die Datenerfassung mittels Multispektral- und Radarsatelliten (z. B. Sentinel-1/-2 und TerraSAR-X/TanDEM-X) /Yang & Mütterthies 2020/. Mittels hochentwickelter InSAR-Auswertung von multitemporalen weltraumgestützten SAR-Bildern lassen sich großräumige Untersuchungen mit relativ geringem Aufwand durchführen. Die Auswertung ist ähnlich einer terrestrischen Messung und Auswertung problemspezifisch zu parametrisieren und stellt daher trotz der teils überregionalen Prozessierungen ein projektbezogenes Individualprodukt dar. Die Interpretation der Ergebnisse ist bis heute Experten vorbehalten.

Die Datenerfassung ist heutzutage nicht mehr als kritisch zu betrachten. Vielmehr sind Fragestellungen hinsichtlich des Datenmanagements großer Datenmengen, die Datenkommunikation zu zentralen Servern und die Ergebnispräsentation in Form von Visualisierungen und Reports von höherer Bedeutung. Die webbasierte Monitoringplattform DMT SAFEGUARD ist hinsichtlich dieser Fragestellungen optimiert und kann den unterschiedlichen Anwendern ein ausgeklügeltes System zur Visualisierung und dem Reporting verschiedenster Messdaten anbieten.

1 LIDAR-INTEGRATION

Im Zuge des Paradigmenwechsels – insbesondere im Bereich der geodätischen Deformationsanalyse mittels TLS – wurden methodische Ansätze in der Anwendung und Auswertung von Messdaten angepasst oder grundlegend neu entwickelt. Methodische Anpassungen werden derzeit in den verschiedenen Forschungsgruppen bearbeitet. So diskutieren beispielsweise /Wujanz 2016/, /Lindenbergh & Pfeiffer 2005/, /Paffenholz 2012/, /Holst & Kuhlmann 2016/, /Neuner et al. 2016/, /Wunderlich et al. 2016/, /Eling 2009/, /Soudarissanane et al. 2011/ oder aktuell /Friedli 2020/ die Herausforderungen und Lösungen für die Deformationsanalyse mittels TLS. Die DMT hat sich dieser Aufgabe angenommen und in den letzten Jahren terrestrische Laserscanner von RIEGL Laser Measurement Systems in die von der DMT entwickelte webbasierte Monitoring-Plattform DMT SAFEGUARD anwendungsbezogen integriert.

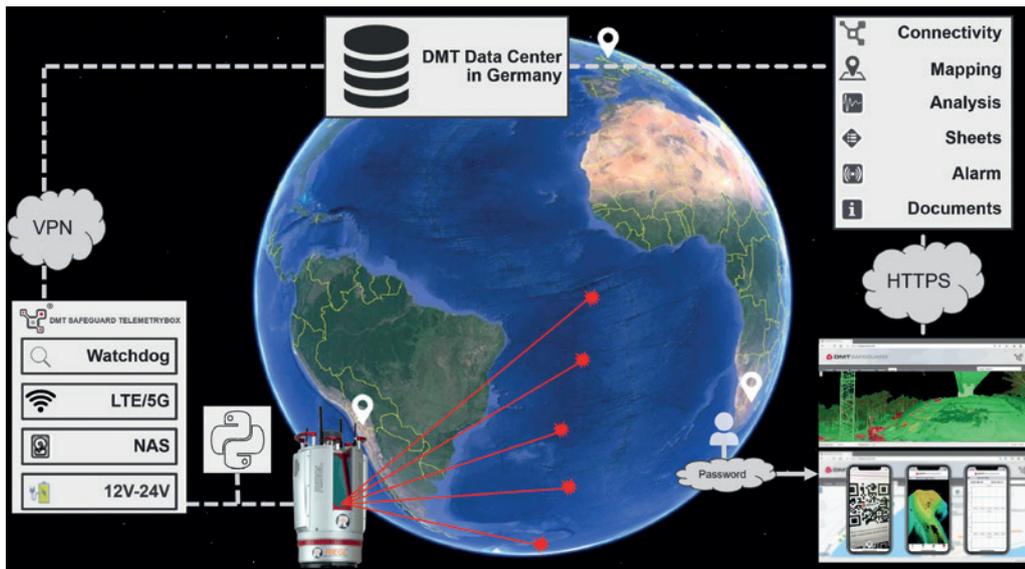


Abb. 1 | DMT SAFEGUARD LIDAR – Interaktion von Messtechnik, Datenmanagement und der Webvisualisierung

Neben den Anforderungen an den Sensor selbst müssen Voraussetzungen an die Datenintegration, die Datenspeicherung und schließlich die Visualisierung erfüllt sein. Die Datenintegration ist eine der zentralen Herausforderungen des digitalen Zeitalters und insbesondere für die sogenannte „Industrie 4.0“ /Zimmermann et al. 2019/. Im Rahmen des Projekts wird das webbasierte Softwareprodukt DMT SAFEGUARD eingesetzt und zielgerichtet weiterentwickelt /Gaisecker & Schröder 2022/.

Integriert wurde ein Scanner der österreichischen Firma RIEGL. Die Wahl fiel auf einen RIEGL VZ-2000i. Mit diesem Scanner können Objekte berührungslos mit einer sehr hohen Genauigkeit bis zu einer Reichweite von 2500 m vermessen werden. Die Laserdistanzmes-

sung erfolgt mittels hochpräziser Pulszeitmessung. Ein augenscheinliches Messsystem und ein nach Klasse 1 spezifizierter Laser ermöglichen darüber hinaus eine automatische, kontinuierliche Messung ohne Gefahr für Menschen im Überwachungsbereich. Für die Integration in ein Überwachungssystem werden über die RiVLiB Schnittstellen bereitgestellt, die es ermöglichen, den Scanner sowohl über externe Software als auch über die Programmiersprache Python zu steuern und einzubinden. Der Scanner ist über eine Cloud-Konnektivität fernsteuerbar und ermöglicht einen kontinuierlichen Datenstrom. Mit einer von der DMT entwickelten Software (z.B. DMT SAFEGUARD) können die Messwerte ausgewertet und visualisiert werden. Abb. 1 zeigt das System schematisch.

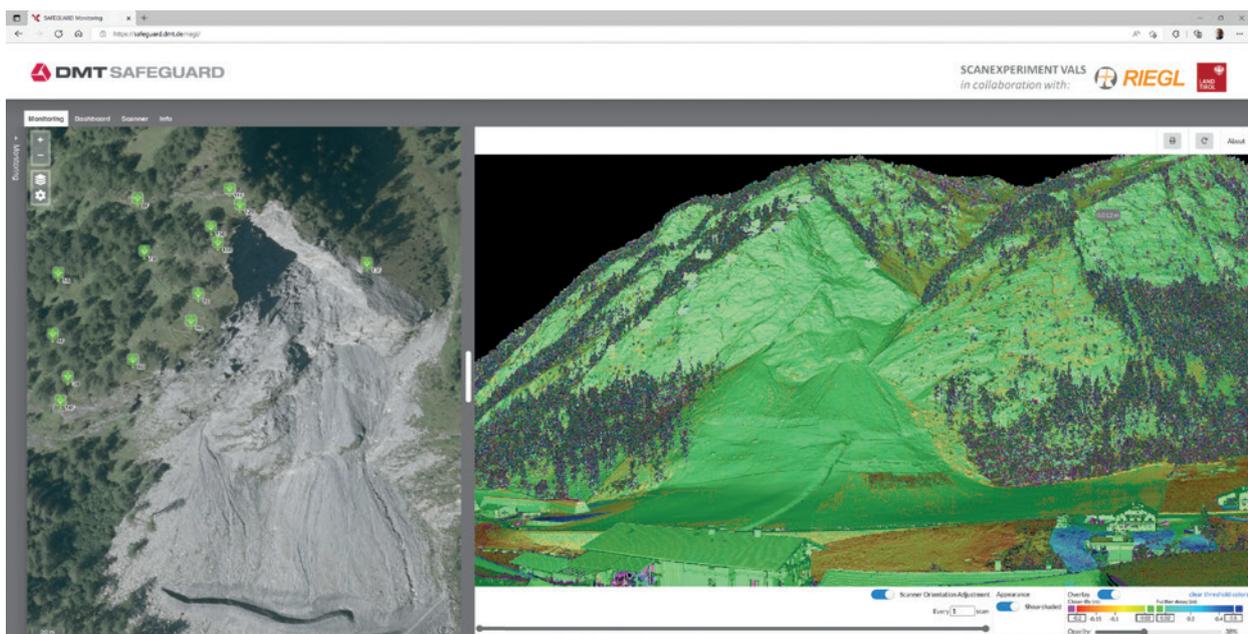


Abb. 2 | DMT SAFEGUARD LIDAR – Webviewer des Felssturzes in Österreich

Mithilfe des DMT-SAFEGUARD-LIDAR-Moduls werden die Messdaten automatisch in relevante Informationen umgewandelt und über eine passwortgeschützte Web-Plattform dem Anwender oder Entscheidungsträgern weltweit zur Verfügung gestellt. Um die Echtzeitfähigkeit des Systems zu gewährleisten, werden die Daten mittels einer von RIEGL entwickelten Monitoring-App dargestellt. Die App ist direkt in SAFEGUARD integriert und der Kunde benötigt keine zusätzliche Software. *Abb. 2* veranschaulicht die Anwendung. Der Benutzer kann innerhalb der Anwendung Berichte erstellen und Partnern bereitstellen. Mehrere Benutzer können gleichzeitig in der Plattform arbeiten, sodass eine kollaborative Teamarbeit jederzeit und in Echtzeit möglich ist.

2 INSAR-INTEGRATION

Das InSAR-Monitoringsystem funktioniert als eine in sich geschlossene Kette von der Bildaufnahme bis zur Produktlieferung (vgl. *Abb. 3*). Die ergänzenden Daten enthalten Ground Truth, A-priori-Wissen, Informationen aus anderen Sensorquellen usw. Die SAR-Bilder werden für einen bestimmten Zeitraum vom jeweiligen Anbieter heruntergeladen und verarbeitet, z. B. alle sechs Tage bei Sentinel-1. Die Strategien und Parameter werden während der Vorbereitung festgelegt, um die Anforderungen bezüglich Präzision, Genauigkeit, Auflösung und Abdeckung zu erfüllen. Anschließend wenden wir fortgeschrittenes differenzielles InSAR (ADInSAR) wie Persistent Scatterer Interferometry (PSI) /Crosetto et al. 2016/, /Ferrett et al. 2001/ und Small Baseline Subset (SBAS) /Berardino et al. 2022/, /Lanari 2007/ an, um die Bodenbewe-

gung am Untersuchungsort zu bewerten. Die vorläufigen Ergebnisse werden anhand von Statistiken und ergänzenden Daten verfeinert. Ziel ist es, die Genauigkeit und Präzision zu verbessern. Die Qualität der Ergebnisse wird während des Analyseschrittes überprüft. Darüber hinaus werden die physikalischen Parameter, z. B. Zeitreihenbewegung, Geschwindigkeit und Beschleunigung, durch Modellierung abgeleitet. Anschließend werden die informativen und zur Entscheidungsfindung verwendeten Produkte, z. B. eine Deformations- oder Risikokarte, für die Beteiligten und Entscheidungsträger erstellt. Die Ergebnisse werden auch in ein integriertes System – DMT SAFEGUARD – in vereinbarten Datenformaten geschrieben (*Abb. 4*). Hier werden verschiedene Daten, Produkte und Informationen gemeinsam ausgewertet, um umfassendes Wissen insbesondere für die Katastrophenvorsorge bereitzustellen. Alle oben genannten Verfahren laufen mithilfe von Spezialisten halb-automatisch ab.

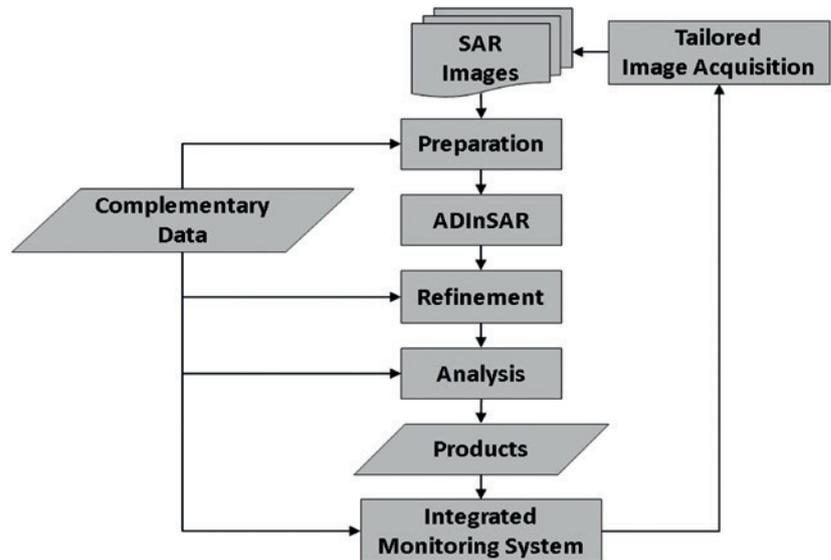


Abb. 3 | Schema der InSAR-Auswertung

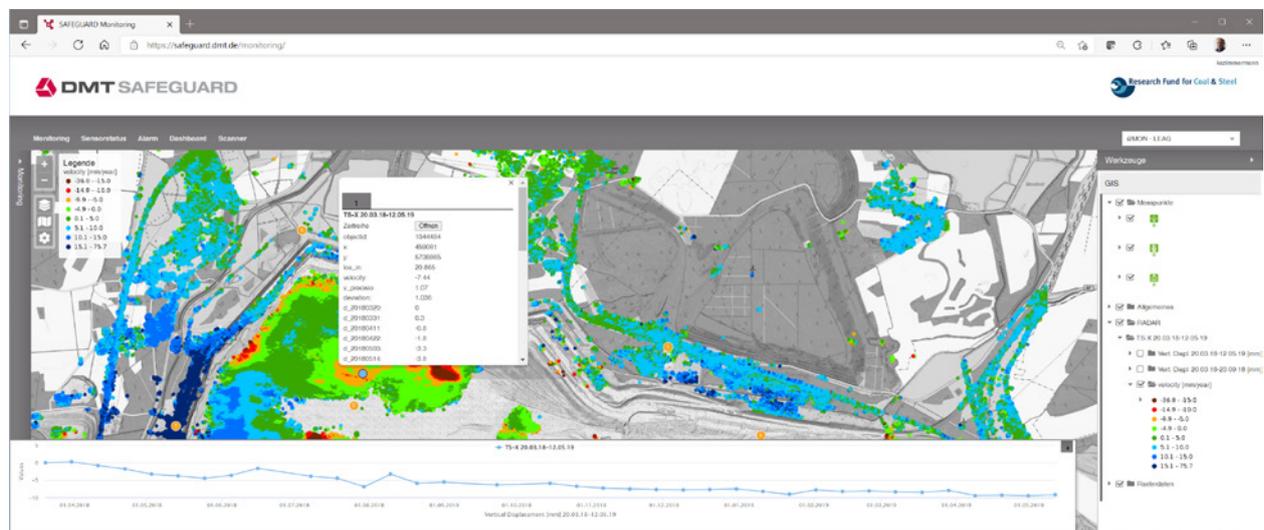


Abb. 4 | DMT SAFEGUARD – Integration und Analyse der InSAR-Daten

Satellit	TerraSAR-X	Sentinel-1	PALSAR-2
Wellenlänge	X-Band (3,1 cm)	C-Band (5,6 cm)	L-Band (22,9 cm)
Erfassungsbreite	5 km ~ 260 km	250 km ~ 400 km	25 km ~ 350 km
Auflösung	0,24 m ~ 40 m	1,7 m ~ 43 m	1 m ~ 100 m
Erneuter Überflug	11 Tage	6 Tage	14 Tage

Tab. 1 | Verfügbare Satellitendaten

Die zivilen Satelliten sind derzeit in den Bändern X, C und L in Betrieb. Die drei am häufigsten verwendeten Satelliten sind TerraSAR-X, Sentinel-1 und PALSAR-2 (Tab. 1). Weitere in Betrieb befindliche und geplante Satelliten sind Capella (X), ICEYE (X), PAZ (X), COSMO-SkyMed (X), Radarsat-2 (C), RCM (C), SAOCOM (L), NISAR (L) und TanDEM-L (L).

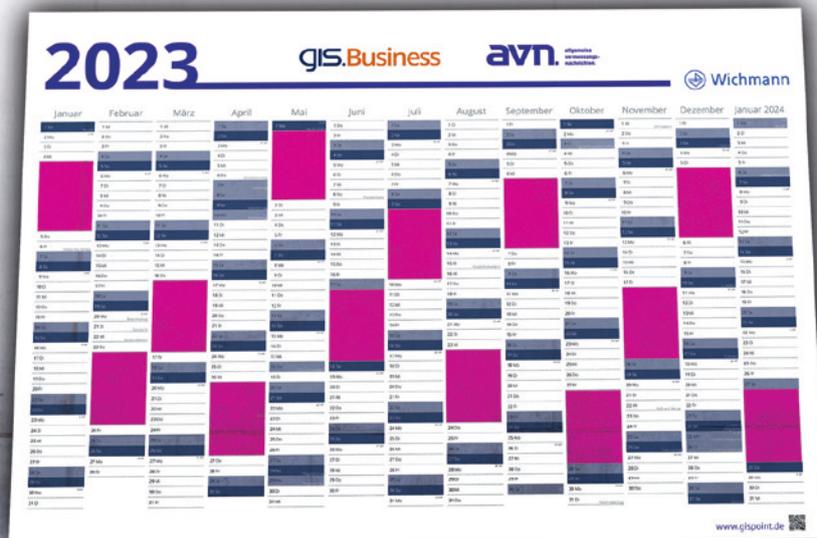
Sentinel-1 wird häufig wegen seiner vielseitigen Eignung verwendet. Erstens führt die Verwendung des C-Bands zu einem Kompromiss zwischen dem X- und dem L-Band. Das X-Band ist in der Lage, kleine Bewegungen zu messen, aber die Ergebnisse leiden unter Kohärenzverlusten (Verschlechterung der Genauigkeit), insbesondere über der Vegetation. Im Gegensatz dazu ist das L-Band robuster gegenüber einem solchen Kohärenzverlust, allerdings werden kleine Bewegungen möglicherweise nicht erkannt. In den meisten Fällen erfüllt das C-Band die Anforderungen der Aufgabe.

Zweitens enthält ein Standardbildpaket dank des TOPSAR-Erfassungsmodus ein großes Gebiet (250 km × 200 km). Eine solch große Abdeckung ermöglicht die synchrone Überwachung mehrerer interessanter Gebiete. Drittens ermöglicht der Wiederholungszyklus von sechs Tagen eine wöchentliche Überwachung. Nicht zuletzt sind die Sentinel-1-Bilder sowohl für die wissenschaftliche als auch für die kommerzielle Nutzung gebührenfrei.

Im Vergleich dazu werden TerraSAR-X-Bilder zwar nicht kostenlos angeboten, aber ihre Ergebnisse zeichnen sich durch hochauflösende Details und eine genauere Bewegungsschätzung aus. Wir werden sie verwenden, um die Details zu untersuchen, wenn Sentinel-1 einen Hotspot mit anormalen Bewegungen entdeckt. Falls erforderlich, werden wir PALSAR-2 nutzen, das vorzuziehen ist, wenn das betreffende Gebiet mit dichter Vegetation bedeckt ist. Die Kombination verschiedener Datenquellen bietet eine umfassende Lösung für die Übersicht und die Überwachung von Hotspots.

3 FAZIT

Wir zeigen in diesem Beitrag die erfolgreiche Implementierung von einem flächenhaften Sensor in eine webbasierte Monitoringplattform auf. Der Paradigmenwechsel ist vollzogen und quasi-flächenhaft messende Sensorik ist wirtschaftlich und effizient einsetzbar. Innerhalb einer solchen Plattform ergänzen TLS und



Planlos?

Wir können helfen!

Unser Kalender bietet eine gute Übersicht zu allen wichtigen Terminen der Geodäsie-Szene in 2023 und ist das ganze Jahr bei Ihren Kunden präsent. Je Monat ist ein frei gestaltbarer Werbeslot im Format 74 × 54 mm buchbar. Auf Wunsch ist eine Exklusivbuchung aller Slots möglich.

Sprechen Sie uns an! Tel.: 069/84 000 6-13 41 tammy.roessler@vde-verlag.de

InSAR etablierte punktbezogene Messsysteme und können einen zusätzlichen Informationsgehalt generieren. Im Sinne eines adaptiven Monitorings lassen sich Scanner für Objekte einsetzen, für welche zunächst die Kenntnis zu den vorhandenen Bewegungsprozessen nicht bekannt sind.

LITERATUR

- Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. (2002): A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40(2002)11, 2375–2383.
- Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanthéry, N.; Crippa, B. (2016): Persistent Scatterer Interferometry: A review. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115(2016), 78–89.
- Eitel, J. U.; Höfle, B.; Vierling, L. A.; Abellán, A.; Asner, G. P.; Deems, J. S.; Vierling, K. T. (2016): Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. In: Remote Sensing of Environment 186(2016), 372–392.
- Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung (Dissertation). https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-641.pdf (13.11.2020).
- Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. (2001): Permanent Scatterers in SAR Interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(2001)1, 8–20.
- Friedli, E. (2020): Point Cloud Registration and Mitigation of Refraction Effects for Geomonitoring using Long-Range Terrestrial Laser Scanning (Dissertation). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000409052> (13.11.2020).
- Gaisecker, T.; Schröder, D. (2022): RIEGL V-Line Scanners for Permanent Monitoring Applications and integration capabilities into customers risk management. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH/DMT GmbH & Co. KG, Horn/Eszen. https://www.dmt-group.com/fileadmin/redaktion/news/Whitepaper_RIEGL_DMT.pdf (15.07.2022).
- Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. In: Journal of Applied Geodesy 10(2016)1, 17–25.
- Lanari, R.; Casu, F.; Manzo, M.; Zeni, G.; Berardino, P.; Manunta, M.; Pepe, A. (2007): An Overview of The Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. In: Pure and Applied Geophysics 164(2007)4, 637–661.
- Lindenberg, R.; Pfeiffer, N. (2005): A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: Gruen, A.; Kahmen, H. (Hrsg): Optical 3-D Measurement Techniques VII. Wien, 61–70.
- Neuner, H.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Overview on Actual Modelling Strategies of Point Clouds for Deformation Monitoring. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 123(2016)11-12, 328–339.
- Niemeier, W.; Heunecke, O. (2004): Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen: Herausforderungen, Konzepte, Trends. In: Ingenieurvermessung 2004, 14th International Course on Engineering Surveying, Zürich, 15.–19. März 2004, 131–142.
- Paffenholz, J.-A. (2012): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors (Dissertation). https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-689.pdf (13.11.2020).
- 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: Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Valencia, Spanien.
- Schröder, D.; Klonowski, J. (2020): i²MON – Integriertes Monitoring von Oberflächen- und Untergrundbewegungen verursacht durch den Kohlebergbau In: Wunderlich, T.A. (Hrsg): Ingenieurvermessung 20. Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2020. Wichmann, Berlin/Offenbach, 269–282.
- Soudarissanane, S.; Lindenberg, R.; Mementi, M.; Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. In: ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing 66(2011)4, 389–399.
- Winiwarter, L.; Anders, K.; Schröder, D.; Höfle, B. (2022): Full 4D Change Analysis of Topographic Point Cloud Time Series using Kalman Filtering. In: Earth Surf. Dynam. Discuss., 1–25. <https://doi.org/10.5194/esurf-2021-103>.
- Wujanz, D. (2016): Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring (Dissertation). https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-775.pdf (13.11.2020).
- Wunderlich, T.; Niemeier, W.; Wujanz, D.; Holst, C.; Neitzel, F.; Kuhlmann, H. (2016): Areal Deformation from TLS Point Clouds – the Challenge. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 123(2016)11-12, 340–351.
- Yang, C.-H.; Mütterthies, A. (2020): Introduction of Integrated Mining Impact Monitoring – i²Mon Development Project. In: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 382(2020), 225–229. <https://piahs.copernicus.org/articles/382/225/2020/>.
- Zimmermann, K.; Schröder, D.; Fingerhuth, S.; Gesche, R. (2019): Integrated Monitoring of Tailings: EIT STINGS. In: Proceedings of Tailings, 10.–12. Juli 2019, Santiago de Chile.

M. Sc. Daniel Schröder

DMT GMBH & CO. KG
CIVIL AND MINING ENGINEERING

Am TÜV 1 | 45307 Essen
daniel.schroeder@dm-tgroup.com



Dr. Karsten Zimmermann

DMT GMBH & CO. KG
CIVIL AND MINING ENGINEERING

Am TÜV 1 | 45307 Essen
karsten.zimmermann@dm-tgroup.com

