

# GNSS, Nivellement und Radar – einheitliche Multisensor-Referenzstationen zur Überwachung von Bodenbewegungen in ehemaligen Bergbaubereichen

VOLKER SPRECKELS, STEFFEN BECHERT, ANDREAS SCHLIENKAMP,  
MICHAEL DROBNIIEWSKI, MICHAEL SCHULZ, FLORIAN SCHÄFER, EVA KEMKES,  
JÜRGEN RÜFFER, WOLFGANG NIEMEIER, DIETER TENGEN,  
THOMAS ENGEL, MICHAEL MÜLLER & PERDITA SCHMITT

Auch nach dem Ende des Steinkohlenbergbaus in Deutschland hat eine Überwachung der Abbaubereiche auf Bodenbewegungen zu erfolgen. Es können Restsenkungen und Hebungen durch den Grubenwasseranstieg auftreten, sowie Tagesbrüche und Bruchspalten in den Altbergbaubereichen an Ruhr und Saar. Die Altbergbaubereiche der RAG werden jährlich mit Bildflügen erfasst, wobei simultan ALS-Daten und Luftbilder aufgezeichnet werden. Für die Bereiche des Grubenwasseranstiegs der RAG kommen Feinnivellements, GNSS-Monitoring und die Persistent Scatterer Interferometrie aus Radarsatellitendaten zum Einsatz. Da eine Wiederholungsgenauigkeit der jeweiligen Bezugspunkte - das sind GNSS-Monitoringstationen, Passpunkte zu den Befliegungen und Corner-Reflektoren für die Radarinterferometrie - von  $\pm 1$  cm in Höhe und Lage über die Jahre benötigt wird, hat die RAG Multisensor-Stationen für GNSS-, Nivellement- und Radardaten entwickelt, die in Zusammenarbeit mit den Landesvermessungsbehörden an Saar und Ruhr errichtet werden sollen. Um in die erforderlichen Genauigkeitsbereiche signifikant vordringen zu können, werden in einem aktuellen Forschungsprojekt der RAG zeitvariante Ausgleichungsverfahren entwickelt und mit Daten aus dem Tagesgeschäft der RAG getestet. Die Arbeiten werden in diesem Beitrag vorgestellt.

## Einleitung

Nach Beendigung des aktiven deutschen Steinkohlenbergbaus im Dezember 2018 ist es weiterhin die Aufgabe der RAG Aktiengesellschaft (RAG), die Überwachung im Nachbergbaubereich und in den Grubenwasseranstiegsgebieten für die Bergbaureviere in Nordrhein-Westfalen (Ibbenbüren & Ruhr) und an der Saar durchzuführen (s. Abb. 1). Das erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Bergämtern sowie den Landesvermessungsverwaltungen im Saarland (LVGL) und in Nordrhein-Westfalen (GEOBASIS NRW). In den oberflächennahen Altbergbaubereichen des Steinkohlenabbaus, der vor mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten erfolgte, treten Tagesbrüche oder Bruchspalten auf. Wohingegen im Nachbergbaubereich jüngeren Datums nur noch geringmächtige Restsenkungen

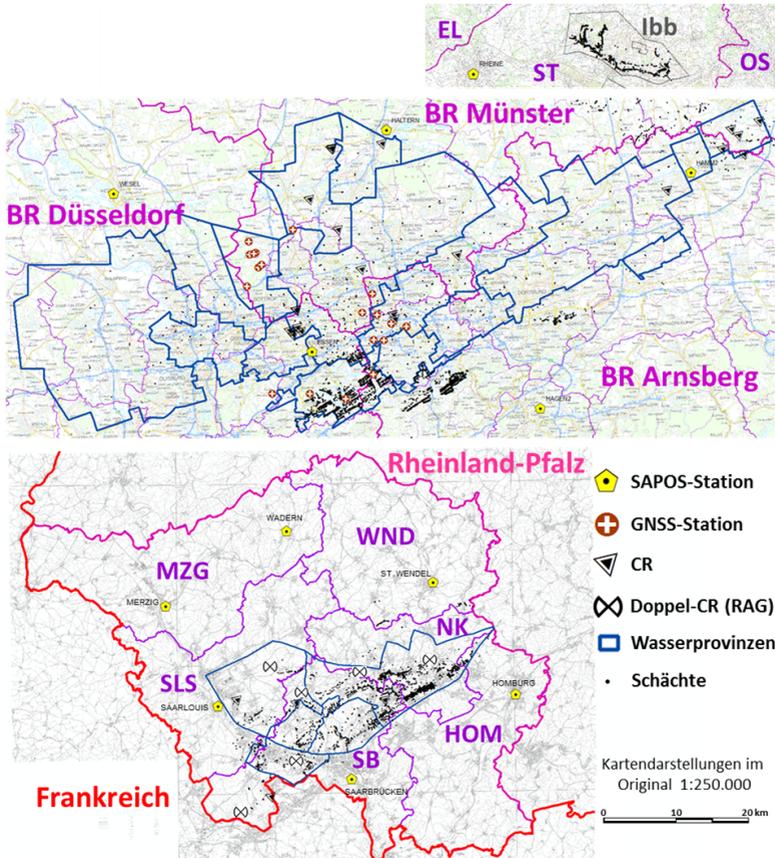


Abbildung 1: Übersicht der RAG Bergbaureviere Ibbenbüren (oben), Ruhr (Mitte) und Saar (unten).

und bei Einstellung der Grubenwasserhaltung nach Beendigung des Bergbaus großflächige Hebungen mit Beträgen von wenigen Dezimetern auftreten (ROSNER, P. ET AL. 2014; HAGER, S. & WOLLNIK, F. 2016; BUSCH, W. & ENGEL, T. 2018).

Die grundsätzliche Problematik jeder Monitoringaufgabe in einem von Bodenbewegungen beeinflussten Gebiet besteht darin, stabile Bereiche außerhalb der gesamten Einflusszone zu detektieren (TENGEN, D. ET AL. 2019). Die aktuellen und zukünftigen Bodenbewegungen in den vom Bergbau beeinflussten Regionen der RAG treten großflächig auf und umfassen Beträge von nur noch einigen Dezimetern. Sie liegen somit auch im Bereich des natürlichen Quellens und Schrumpfens bindiger Böden im Jahresgang oder anderer überlagernder Einflüsse, wie zum Beispiel Veränderungen des Grundwasserflurabstands. Es werden damit sehr hohe Anforderungen an die zugrunde liegenden Lage- und Hö-

henreferenzen und die eingesetzten Monitoringverfahren gestellt, um die auftretenden Bewegungen zu detektieren und die Grenzen zwischen stabilen und bewegten Bereichen zu definieren.

Verschiedenste Messverfahren wie Nivellement, Tachymetrie, GNSS, kombinierte Luftbild/LIDAR-Befliegungen und fernerkundliche Radarverfahren haben sich mittlerweile im Bereich des Geomonitoring etabliert und bewährt (SPRECKELS, V. ET AL. 2016 B). Für eine zielgerichtete Nutzung der Ergebnisse müssen die Vorteile der einzelnen Verfahren jedoch zu einem integralen Monitoringsystem verknüpft werden; Ansätze auf diesem Weg sollen hier vorgestellt werden. Als wichtigen Schritt auf diesem Weg hat die RAG ein Konzept für Multisensor-Referenzstationen (MSST) entwickelt, um GNSS, Radar und Nivellement zu verknüpfen, sodass die unterschiedlichen Verfahren einander räumlich und zeitlich zugeordnet werden können.

Ein solches multisensorales Monitoringsystem erlaubt über die Kombination der hochgenauen Höhen des wiederholten Präzisionsnivellements, der hohen Messfrequenz auf permanent registrierenden GNSS-Monitoringstationen und der langfristigen flächendeckenden Überwachung per Radarinterferometrie eine einheitliche und präzise Bestimmung von Bodenbewegungen in Zeit und Raum.

Neben dieser räumlichen und zeitlichen Zuordnung der Messdaten gilt es aber auch, die Ansätze in der Datenauswertung und Datenhaltung zu verbessern. Dabei soll das in der Geodäsie gebräuchliche Konzept der zeitinvarianten Koordinaten grundlegend überdacht werden und eine zeitvariable Beschreibung von Lage- und Höhenkoordinaten entwickelt werden.

Diese Anforderungen beziehen die vierte Dimension „Zeit“ mit ein, sodass die Datenhaltung entsprechend angepasst werden muss. Bei der RAG erfolgte das bereits mit der im Jahr 2009 im Tagesgeschäft eingesetzten GeoMon-Punktdatenbank (KAMPHANS, K. ET AL. 2008), die nun als GeoMonPlus dem aktuellen Stand in GIS und GDI angepasst wurde. Die GNSS-Monitoringdaten laufen im GLOMON-Portal der ALLSAT GmbH zusammen, für das nun neue Entwicklungen zur dynamischen Netzausgleichung aus dem Programm PANDA der GEOTEC GmbH angepasst werden.

Die mit diesen Sensoren und Verfahren gewonnenen Erfahrungen werden in das neue Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“ der DIN-Normungsreihe 18740 einfließen (ADAM, N. ET AL. 2020).

## **Monitoringaufgaben in den ehemaligen Bergbaubereichen**

Die aktuellen und zukünftigen Aufgaben zur Überwachung der Tagesoberfläche für den ehemaligen Bergbaubereich der RAG können in zwei Gruppen unterteilt werden, den Altbergbaubereich und den Nachbergbau- bzw. Grubenwasseranstiegsbereich. Die Überwachungsverfahren wurden ausführlich in SPRECKELS, V. ET AL. 2018 beschrieben und werden hier nur der Vollständigkeit halber kurz aufgeführt.

Der Altbergbaubereich ist durch den oberflächennahen Steinkohlenbergbau gekennzeichnet, der vor gut 300 Jahren begann. Hier kommt es an der Ruhr zumeist zu Tagesbrüchen von einstürzenden Stollen und Schächten aufgrund von Erosion und verwitterndem Aus-

bau. An der Saar entstehen zumeist Bruchspalten, die sich an der Tagesoberfläche mit wenigen Metern bis zu 10 Metern ausprägen. Die Erfassung erfolgt hier großflächig über kombinierte Befliegungen mit hochauflösenden Luftbildkameras und Airborne Laserscanning (kurz ALS oder LIDAR genannt), für Sanierungsbereiche mit UAV und RTK-GNSS-Messungen. Die Lage- und Höhenreferenz im SAPOS-Netz erfolgt durch Echtzeit- und statische GNSS-Messungen für Befliegungspasspunkte und für die Koordinatenerfassung der Projektionszentren im Bildflugzeug oder UAV. Versuche zur Erfassung dieser lokal und kleinräumig auftretenden Tagesbrüche mit radarinterferometrischen Verfahren aus C-Band Satelliten (Radarsat-2, Envisat) haben bisher bei der RAG keine signifikanten Ergebnisse gebracht.

Im Grubenwasseranstiegsbereich werden gemäß Abschluss- oder Sonderbetriebsplänen der Aufsichtsbehörden die Sumpfungmaßnahmen im verlassenen Grubengebäude so eingestellt, dass bis zu einer vorgegebenen Teufe das Grubenwasser ansteigen kann und ab dort zur Einrichtung eines Grubenwasserhorizontes gehoben wird. Der Anstieg ist im Ruhrgebiet und an der Saar für einige Bergwerksbereiche schon abgeschlossen. In den Anstiegsbereichen kommt es zu geringen Hebungen von einigen Dezimetern an der Tagesoberfläche (ROSNER, P. ET AL. 2014). Die Erfassung erfolgt hier über Feinnivellements auf Beobachtungslinien im Anschluss an die Leitnivellements der Vermessungsverwaltungen der Länder, GEOBASIS NRW und LVGL. Großflächig kann auch die radarinterferometrische PSI-Auswertung wertvolle Informationen zu den Flächen zwischen den Beobachtungslinien liefern, vor allem wenn die Ascending- und Descending-Daten prozessiert und miteinander verschnitten werden (YIN, X. & BUSCH, W. 2018). Dazu bedarf es allerdings einer genauen Referenz, die durch die MSST gegeben werden kann.

Die Größenordnungen der zu detektierenden Phänomene des Altbergbaus und des Grubenwasseranstiegs sind vergleichbar, sodass die MSST als eine einheitliche geometrische Referenz für alle Aufgaben der RAG in den Revieren an Ruhr und Saar verwendet werden können.

## Multisensor-Stationen (MSST)

In dem hier vorgestellten Konzept bilden die MSST in Zukunft eine einheitliche Referenz für alle Geomonitoringaufgaben im Bereich der RAG für aktuelle und neue Dienste. Hierzu zählen u.a. Dienste zur Bodenbewegungserfassung, wie das Saarländische Bodenbewegungskataster SaarBoBeKa 2020, das für das Jahr 2021 angekündigte Bodenbewegungskataster NRW (RIECKEN, J. ET AL. 2019) und der SAPOS-Dienst für GNSS-Messungen. Weiterhin ist die Validierung und Nutzung weiterer Dienste Dritter denkbar, wie z. B. dem Ende November 2019 veröffentlichten Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (KALIA, A.-C. ET AL. 2017). Die MSST können aber auch ein Bindeglied bilden zwischen den traditionellen Verfahren der Bodenbewegungsüberwachung und den neuen fernerkundlichen Monitoringkonzepten (RUDOLPH, T. ET AL. 2020).

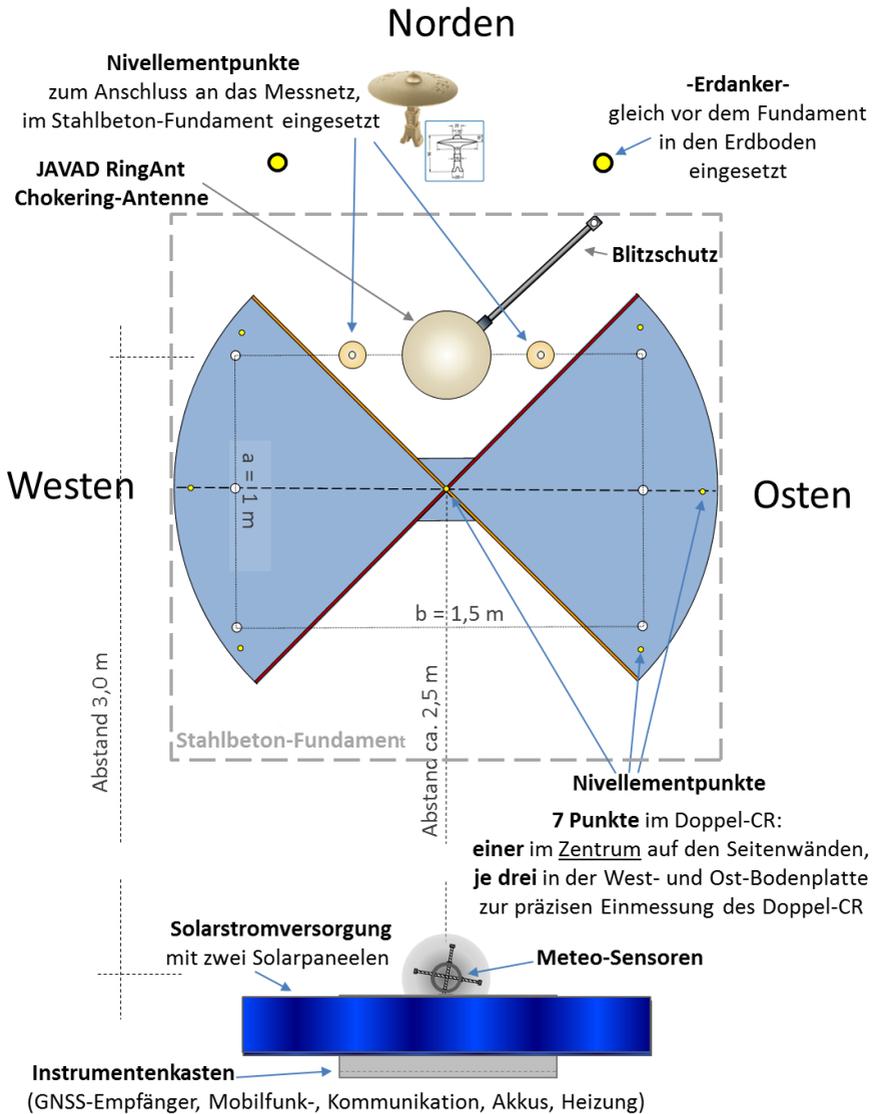


Abbildung 2: Konstruktionsskizze einer Multisensor-Referenzstation (MSST) aus Doppel-CR, GNSS-Monitoringstation, Nivellementanschlusspunkten, Datenübertragung, autarke Energieversorgung (Aufsicht)

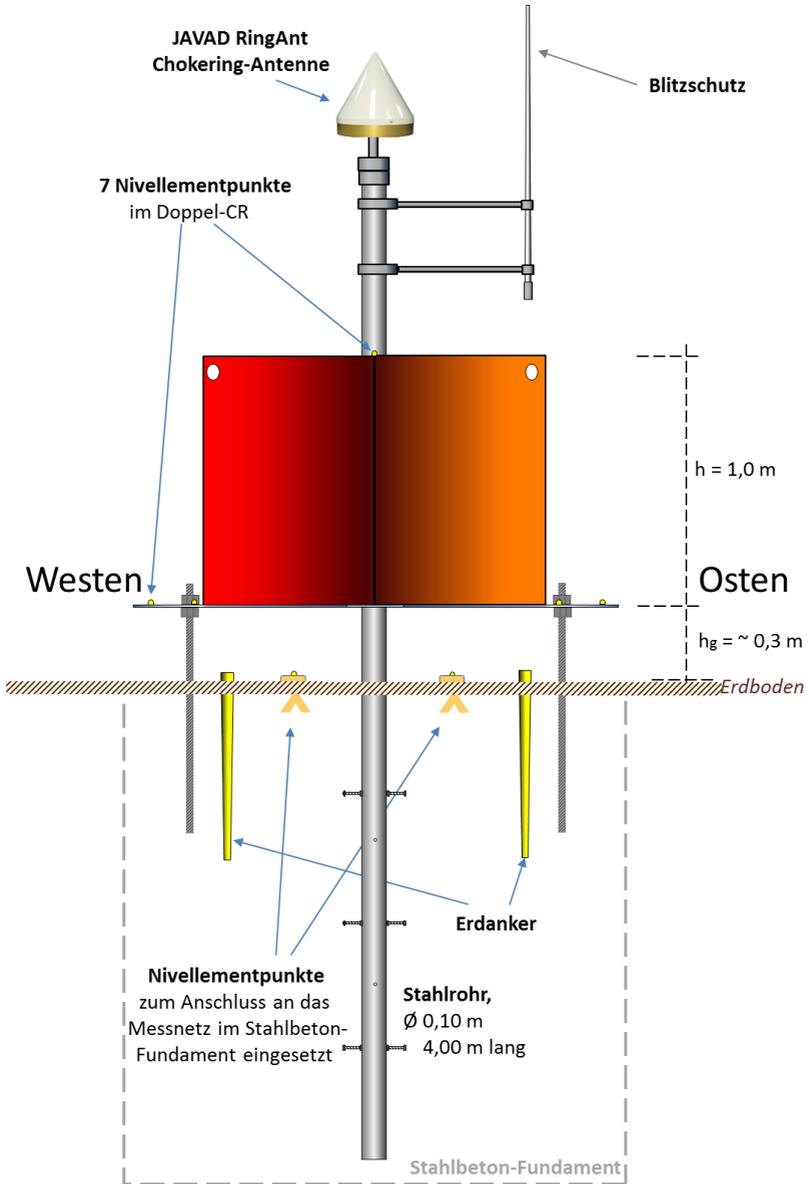


Abbildung 3: Konstruktionsskizze einer Multisensor-Referenzstation (MSST) aus Doppel-CR, GNSS-Monitoringstation, Nivellementanschlusspunkten (Seitenansicht von Süden)

Massive Stahlbeton-Fundamente mit Ausmaßen von ca. 2 m x 2 m x 2 m bilden, je nach Bodenbeschaffenheit auch abweichend, die Grundlage der MSST (s. Abb. 2 und Abb. 3). Ein massiver dauerstandsischer Doppel-Corner-Reflektor (Doppel-CR) besteht aus 1 cm dickem Edelstahl und hat bei 1 m Kantenlänge ca. 450 kg Gewicht. Er ist über Gewindestangen fest mit dem Fundament verbunden. Die Gewindestangen ermöglichen die Justierung der horizontalen Bodenplatte des in Ost-West-Richtung ausgerichteten Doppel-CR. Dieser bildet die Referenz für SAR-Aufnahmen aus Ascending- und Descending-Orbit Daten und ist so als passiver Reflektor für alle aktuellen Radarsatellitensysteme geeignet. Mit Hilfe der über Nivellements und GNSS-Messungen in Lage, Höhe und zeitlich eindeutig bestimmten Doppel-CR werden radarinterferometrische Persistent Scatterer-Auswertungen (PSI) sowohl aus Satellitenszenen des Ascending-Orbits als auch des Descending-Orbits eindeutig georeferenziert, was somit erlaubt, diese PSI-Auswertungen mit höchster Genauigkeit zu validieren. Über sieben Messnägeln im Doppel-CR (drei je Bodenfläche Ost und West und einer im zentralen Kreuzungspunkt der Seitenflächen) sowie über zwei Messpunkte im Fundament erfolgt die hochgenaue Übertragung der Lage und Höhe des MSST in das Amtliche Lage- und Höhenfestpunktfeld. Die GNSS-Messdaten der absolut kalibrierten Choke-Ring-Antennen, die ebenfalls fest in den Fundamenten verankert sind, dokumentieren zum einen die Lage und die Höhe der MSST über die Zeit, zum anderen dienen sie, neben den SAPOS-Daten der Vermessungsverwaltungen der Länder, als Referenzdaten zur präzisen GNSS-Messung im Tagesgeschäft und von Befliegungspunkten. Über Meteosensoren werden stündlich Wetterdaten erfasst und zusammen mit den GNSS-Messdaten an das GLOMON-WebPortal übermittelt. Die Energieversorgung erfolgt in der Regel autark über Solarstrom.

Wie in einem späteren Abschnitt ausführlich dargelegt wird, werden die GNSS- und Meteo-Messdaten der MSST automatisiert im Webportal GLOMON der ALLSAT GmbH prozessiert, wobei eine im Rahmen eines aktuellen RAG FuE-Projektes neu entwickelte dynamische Netzausgleichung im Programm PANDA der GEOTEC GmbH zur Anwendung kommt. Eine einheitliche Auswertung der Messdaten der RAG für die Bereiche an der Ruhr und an der Saar ist im GLOMON-Webportal vorgesehen.

Die MSST sind mit einheitlichen Vorgaben konfektioniert und werden an ausgewählten Standorten installiert (Abb. 4). Im Saarland wird das MSST-Konzept im Jahr 2020 umgesetzt, für die Bereiche der RAG an der Ruhr ist eine Umsetzung mit neun MSST über ein Gebiet von ca. 120 km x 75 km bis Ende 2022 geplant. Für den kleineren Bereich Ibbenbüren sind die aktuellen Überwachungsverfahren ausreichend.

Die Arbeiten an der Saar erfolgen in enger Abstimmung mit dem Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung des Saarlands (LVGL) und dem Oberbergamt Saarland (OBA). Die MSST sind Bestandteil des saarländischen Bodenbewegungskatasters SaarBoBeKa. Sechs MSST der RAG werden im Bereich des ehemaligen saarländischen Steinkohlenbergbaus errichtet und fünf weitere MSST des LVGL im übrigen Landesgebiet. Im Jahr 2019 erfolgte eine Präzisionsnivellement-Kampagne im Saarland über 199,54 km

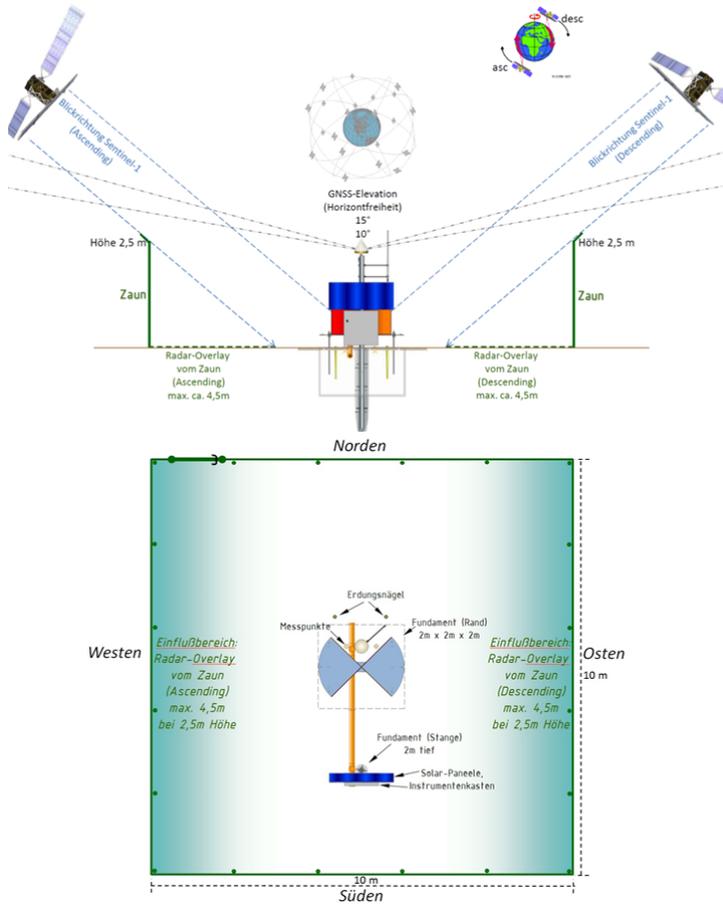


Abbildung 4: Planskizze für den Standort einer konfektionierten Multisensor-Station (MSST): Aufsicht (oben), Seitenansicht von Süden (unten).

Doppelnivellement mit Anschluss an die DHHN2016 Messlinien. Diese Messlinien queren zum einen den Abbaubereich der RAG, zum anderen dienen sie dazu, die MSST an das Höhennetz anzuschließen (Abb. 5).

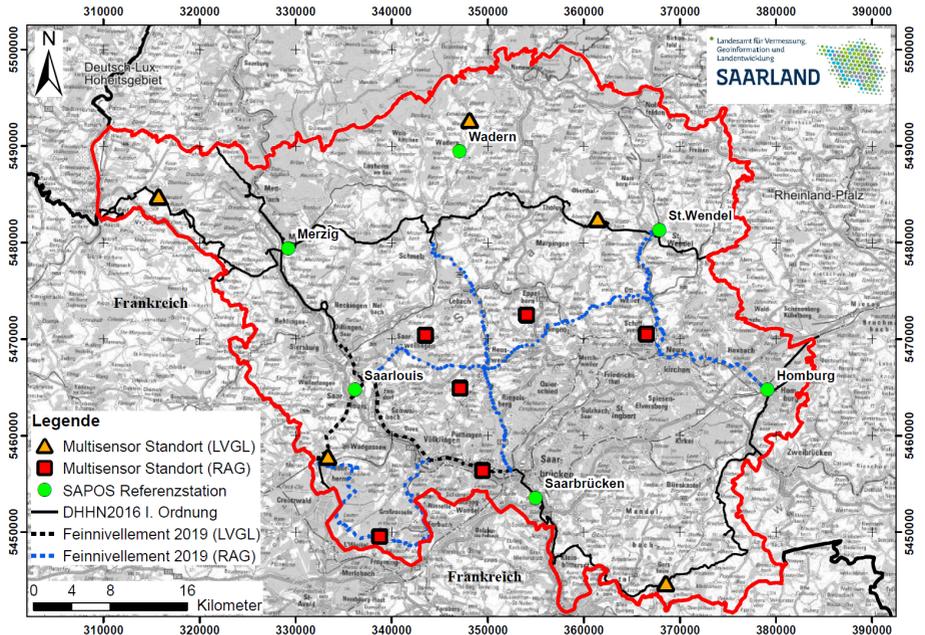


Abbildung 5: Umsetzung des Monitoringkonzepts SaarBoBeKa im Saarland

## MSST: Vorarbeiten, Entwicklungen und Status Quo

Zurzeit erfolgt das GNSS-Monitoring mit Referenzstationen nur an der Ruhr. Die radarinterferometrischen Untersuchungen an Doppel-CR finden nur an der Saar statt. Im Jahr 2020 können dann an der Saar die Multisensor Datenbetrachtungen an den MSST erfolgen.

Bereits seit dem Jahr 2006 hat die RAG Corner-Reflektoren (CR) der Bauart des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen (IGMC) der TU Clausthal (SCHÄFER, T. ET AL. 2008) für radarinterferometrische Auswertungen aus Descending-Orbit Daten in FuE und im Tagesgeschäft an der Ruhr und seit Ende 2010 an der Saar installiert. Für ein robustes Bodenbewegungskataster werden jedoch Auswertungen aus dem Ascending- und dem Descending-Orbit benötigt, sodass diese CR zukünftig noch für Nachbetrachtungen und zu Validierungszwecken herangezogen werden können.

In Zusammenarbeit mit ALLSAT betreibt die RAG seit Dezember 2014 das GNSS-Monitoring im Ruhrgebiet (Abb. 6). Beginnend über einem seit aktiven Abbau des ehemaligen Berg-

werks Prosper-Haniel, einem temporären Grubenwasseranstieg und den Befliegungsbereichen im Altbergbaubereich mit derzeit neun permanenten Zweifrequenz-Referenzstationen, die im GLOMON-Portal geführt werden. Hier konnten erstmals die relativen Höhenänderungen aus Nivellement, GNSS und PSI zusammen betrachtet und bewertet werden (SPRECKELS, V. ET AL. 2016). Seit 01.03.2018 können Dienstleister auch auf die RINEX-Daten der GNSS-Monitoring Stationen im GLOMON-Portal zugreifen. Im Jahr 2019 wurde das beim LVGL eingesetzte GNSS-Netzausgleichsprogramm WAPNET auch in GLOMON eingebunden.



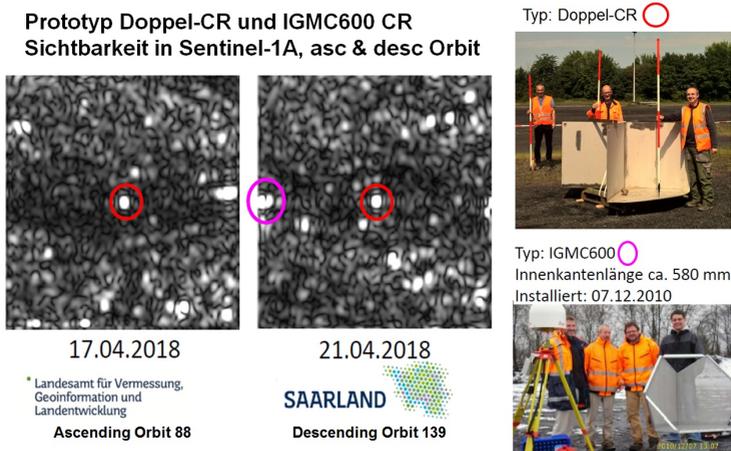
**Abbildung 6:** GNSS-Monitoring-Referenzstationen, von links nach rechts: Flughafen Essen-Mühlheim und Pumpstation BO-Dahlhausen, Feuerwehr Essen-Kupferdreh (temporär)

Im Sommer 2017 begannen die Gespräche zwischen dem OBA, LVGL und RAG zur zukünftigen Bodenbewegungsüberwachung, was zum SaarBoBeKa-Konzept mit den jahresweisen PSI-Auswertungen des LVGL und im Sommer 2019 mit dem gemeinsamen Beschluss zum MSST-Design führte.

Zur Auswertung der Radardaten in eigener Hand hat das LVGL eigene Kompetenzen aufgebaut. Messtechnische Grundlage sind Daten der Sentinel-1 Mission im Rahmen des Copernicus Programms, unter Nutzung der Auswertemethode der Persistent Scatterer Interferometry (PSI). Um ein möglichst qualitätsgesichertes Höhenänderungsprodukt für die Fläche entstehen zu lassen, werden nach dem Ansatz von (YIN, X. & BUSCH, W. 2018) Auswertungen aus beiden Blickrichtungen des Ascending- und Descending-Orbit kombiniert. Zur Gewährleistung einer frühzeitigen Erkennung möglicher Bodenbewegungen ist ein Aktualisierungszyklus von einem Jahr vorgesehen, welcher wenn nötig auf ein halbes Jahr verkürzt werden kann. Mitte 2019 wurde diesbezüglich eine erste Auswertung durchgeführt. Das LVGL führte für die Jahre 2015 und 2016 eine flächendeckende Bodenbewegungsberechnung für das gesamte Saarland durch, bei der im Ergebnis eine Genauigkeit im mm-Bereich bei einer mittleren Standardabweichung von  $\pm 2,5$  mm erreicht wurde. Aktuell findet am LVGL bereits die nächste Auswertung statt, um die Zeitreihe bis 2018 zu vervollständigen.

Die Ergebnisse sollen innerhalb des Jahres 2020 im GeoPortal des Saarlandes zur Verfügung gestellt werden.

Seit April 2018 befindet sich der Prototyp des Doppel-CR am Standort Duhamel in Ensdorf an der Saar. Er wurde für Testreihen bewusst nicht fest installiert, sodass mit ihm Änderungen der Ausrichtung, Verkippungen und Tests zu Mehrwegeausbreitungen zu GNSS-Antennen auf einem MSST erfolgen konnten (Abb. 7). Der Doppel-CR wurde um mehrere Gon verdreht und um ca. 10 Gon gekippt, was nur zu geringen Änderungen der Rückstrahlintensität führte und die Eignung dieser robusten Konstruktion als Referenzpunkt bestätigt (Abb. 8). Erst ab einem in Azimut und Elevation um 20 Gon schräg versetzt einfallenden Radarstrahl überschreitet nach (JOECKEL, R. & STÖBER, M. 1991) der Streckenfehler zum Mittelpunkt des Doppel-CR einen Betrag von 2 cm. Für alle aktuellen Radarsatellitensysteme wird ein maximaler Winkelversatz um 10 Gon mit einer resultierenden absoluten Streckenabweichung unter 1 cm erwartet.



**Abbildung 7:** Standort Duhamel: Doppel-CR in Sentinel-1A asc (links). CR22 und Doppel-CR in Sentinel-1A desc (Mitte). Doppel-CR beim Einfluchten O-W (rechts oben), CR22 (rechts unten).

Der Doppel-CR ist sehr gut in C-Band Daten der Sentinel-1 Satellitenreihe zu erkennen, aber auch in TerraSAR-X Szenen, wie eine Auswertung von Airbus Defence and Space, Potsdam (AIRBUS D&S) für die RAG zeigte (Abb. 8, rechts).

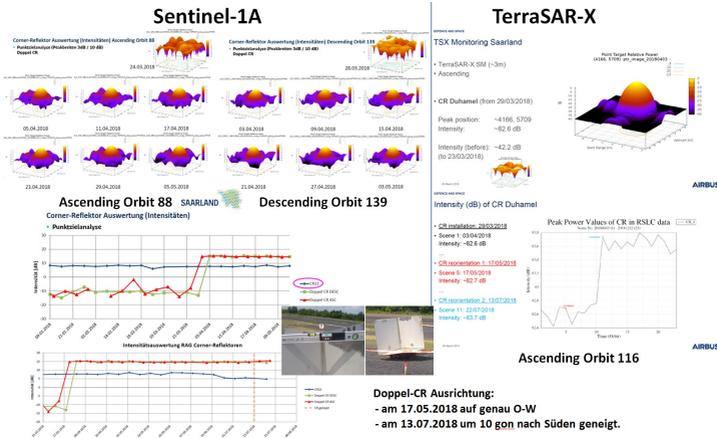


Abbildung 8: Corner-Reflektor Auswertungen zum Prototyp Saar. Links: Auswertungen LVGL zu Sentinel-1A: Doppel-CR asc (rot) und desc (grün), CR22: blau (desc). Rechts: Corner-Reflektor Auswertung Airbus D&S zu TerraSAR-X (asc).

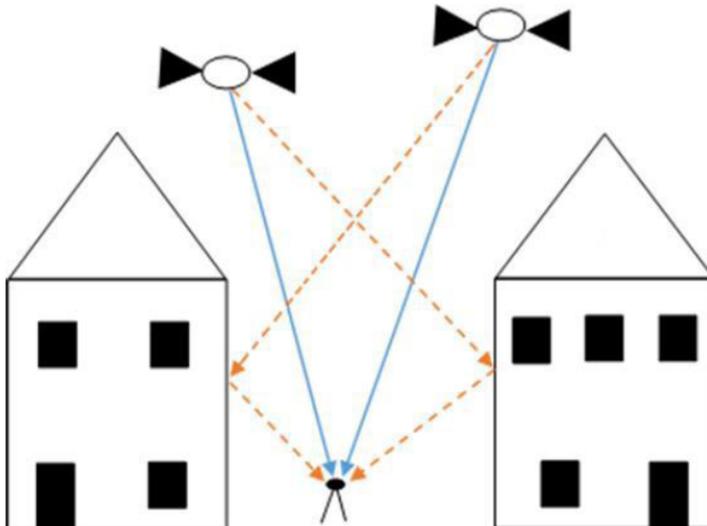


Abbildung 9: Prinzipskizze zu Mehrwegeausbreitungen

## Untersuchungen zu GNSS-Mehrwegeeffekten

Als Mehrwegeausbreitung (engl. Multipath) wird der Effekt bezeichnet, bei welchem ein Satellitensignal sowohl auf direktem Weg als auch durch Reflexionen an der Umgebung das Antennenphasenzentrum erreicht (Abb. 9).

Aufgrund der aufgezeigten Bauweise wurde die Vermutung geäußert, dass es am Doppel-CR zu Mehrwegeeffekten bei der GNSS-Messung kommen könnte. Andererseits sollten, beruhend auf dem Design eines Corner-Reflektors, die einfallenden Radar- oder GNSS-Signale phasengleich und kohärent direkt zur Sendequelle reflektiert werden, ohne mit der GNSS-Antenne in Wechselwirkung zu treten.

Es wurden daher vom LVGL im Herbst 2019 mehrere Messkampagnen mit unterschiedlichen Szenarien durchgeführt, um einen eventuellen Einfluss des Doppel-Corner-Reflektors zu untersuchen. Die Messungen erfolgten mit je zwei Zweifrequenz-Chokering GNSS-Antennen auf zwei unterschiedlichen Standorten, wobei eine Antenne direkt über dem Doppel-CR aufgebaut wurde. Die Standorte waren ein freies Gelände und ein Standort in der Nähe von Gebäuden und Bäumen.

Hier wurden die Messungen mit und ohne Doppel-CR auf Stativen und auf Platten am Boden befestigt durchgeführt, wobei die zweite Antenne auch in unterschiedlicher Entfernung zum Doppel-CR aufgestellt wurde (Abb. 10).

Für die Mehrwegeuntersuchung wurde am LVGL und bei ALLSAT das WASOFT-Modul WAPNET verwendet. Dieses bietet neben der Möglichkeit einer GNSS-Netzauswertung auch einen Modus zur Multipath-Untersuchung in GNSS-Referenzstationsnetzen. Die Analyse basiert auf der Untersuchung von ionosphärenfreien Linearkombinationen von Zweifrequenz Trägerphasenmessungen. Die beiden Signale werden überlagert empfangen, wobei das indirekte Signal immer eine längere Laufzeit besitzt. Eine Reflexion kann dabei an Reflektoren oberhalb des Antennenhorizontes, beispielsweise an Gebäuden und auch am Boden unterhalb des Antennenhorizontes stattfinden.



**Abbildung 10:** Links: Aufbau der Standpunkte 0971 über dem Doppel-CR und Punkt 0988 links daneben. Rechts: Standpunkte 0971 (vorne) und Punkt 0988 (hinten) auf Bodenplatten.

Das ausgewertete Netz beinhaltet die fünf SAPOS Stationen 0928 Homburg, 0930 Saarbrücken, 0931 Saarlouis, 0932 St-Wendel und 0934 Wadern sowie die jeweils zu untersuchenden zwei Antennen auf Stativen bzw. auf den Bodenplatten.

Die Datengrundlage für die Multipathuntersuchungen bilden sechs Messkampagnen in

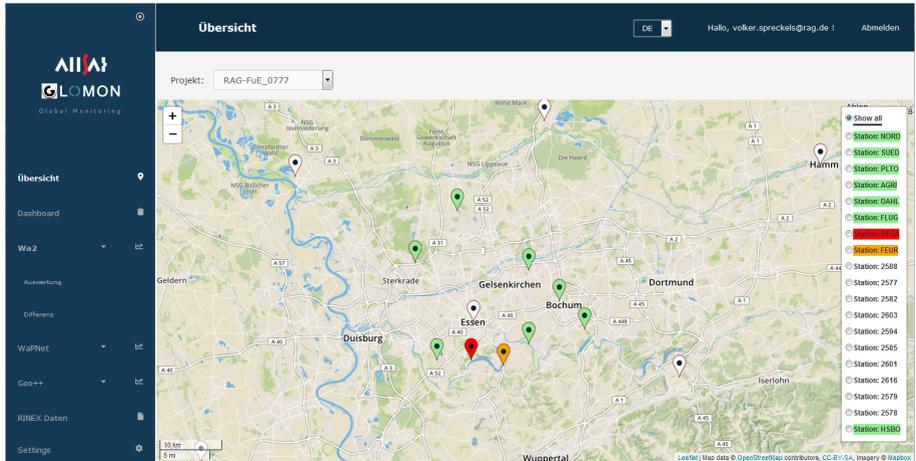
unterschiedlichen Konfigurationen für die zu untersuchenden Stationen. Für alle Messtage stehen Beobachtungsdaten von fünf SAPOS Referenzstationen zur Verfügung, welche für eine gemeinsame Netzauswertung genutzt werden. Das Beobachtungsintervall betrug für alle Stationen 30 Sekunden, die Beobachtungsdauer zwischen ein und fünf Tagen. Für die Multipathuntersuchung mit WAPNET wurden die Broadcast-Ephemeriden verwendet, Präzise Ephemeriden, Ionosphärenmodelle sowie Korrekturen für Empfänger- und Satellitenantennen wurden nicht benötigt. WAPNET erstellt bei aktivierter Multipathanalyse Multipath-Karten für jede Station im untersuchten Netz. Dabei wurde jeweils eine Karte für jedes verfügbare GNSS (GPS und GLONASS) erstellt, sodass diese getrennt voneinander interpretiert werden konnten. Ein direkter Vergleich zwischen den Systemen war aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an beobachteten Satelliten nur bedingt möglich. Die Auswertungen zeigen die bei statischen Messungen auftretenden periodischen Mehrwegeeffekte. Bei einem geringen Abstand zwischen Antenne und Reflektor von einem Meter oder weniger, ergeben sich Perioden der Phasenfehler des Signals von mehreren Stunden und bei Abständen von mehreren Metern betragen die Perioden nur wenige Minuten. Aus dieser Tatsache ergibt sich eine Möglichkeit zur Verringerung des Mehrwegeeffekts. Bei der Durchführung einer statischen Messung, mitteln sich die Abweichungen aufgrund der Mehrwegeausbreitung über die Beobachtungsdauer heraus. Je nach Entfernung zum Reflektor reichen schon minimale Beobachtungszeiten von wenigen Minuten aus, sodass alle Messzeiträume ausreichend lang waren. Es zeigten sich für alle Messkampagnen sowohl in der Auswertung des LVGL als auch in der Auswertung von ALLSAT keine Hinweise auf signifikante Mehrwegeeffekte durch den Doppel-CR.

## Datenhaltung und Datenauswertung in GLOMON

Die GNSS-Daten werden automatisiert im Webportal GLOMON der ALLSAT GmbH prozessiert, wobei eine im Rahmen eines aktuellen RAG FuE-Projektes neu entwickelte dynamische Netzausgleichung der GEOTEC GmbH zur Anwendung kommt. Bei den RAG Projekten an der Ruhr in NRW wird das Post-Processing mit der GEO++ Software durchgeführt, im Saarland kommt wie beim LVGL das Programm WAPNET zum Einsatz. Die im FuE-Projekt der RAG entwickelte dynamischen Netzausgleichung ist sowohl für Bereiche an der Ruhr als auch an der Saar vorgesehen.

### Datenauswertung in GLOMON

Im Webportal GLOMON der ALLSAT GmbH findet die automatisierte Auswertung der GNSS-Messungen statt. Im Rahmen eines RAG FuE-Projektes bilden verschiedene SAPOS-Stationen sowie weitere GNSS-Referenzstationen in NRW ein Netz (Abb. 11). Insgesamt besteht das Netz aus 19 Zweifrequenz-Referenzstationen. Es werden die Daten von zehn SAPOS-Stationen (weiß) aus der OpenGeoData-Bibliothek NRW bezogen. Die neun RAG-Referenzstationen (grün, ggf. orange und rot) streamen die GNSS-Messdaten per Mobilfunk kontinuierlich an den Server der ALLSAT GmbH, wo sie für eine spätere Auswertung gespeichert werden.



**Abbildung 11:** Übersicht Ruhrgebiet: SAPOS-Stationen (weiß), RAG GNSS-Referenzstationen mit Funktionsmeldungen (grün: online; orange: < 24 h offline; rot: > 24 h offline)

Für die Netzauswertung im Post-Processing sind die beiden Softwarelösungen von GEO++ (GNREF+GNNET) und WASOFT (WAPNET) in GLOMON integriert. Von der Rohdatenkonvertierung bis hin zur Darstellung der Ergebniszeitreihen steuert GLOMON die notwendigen Schritte automatisiert.

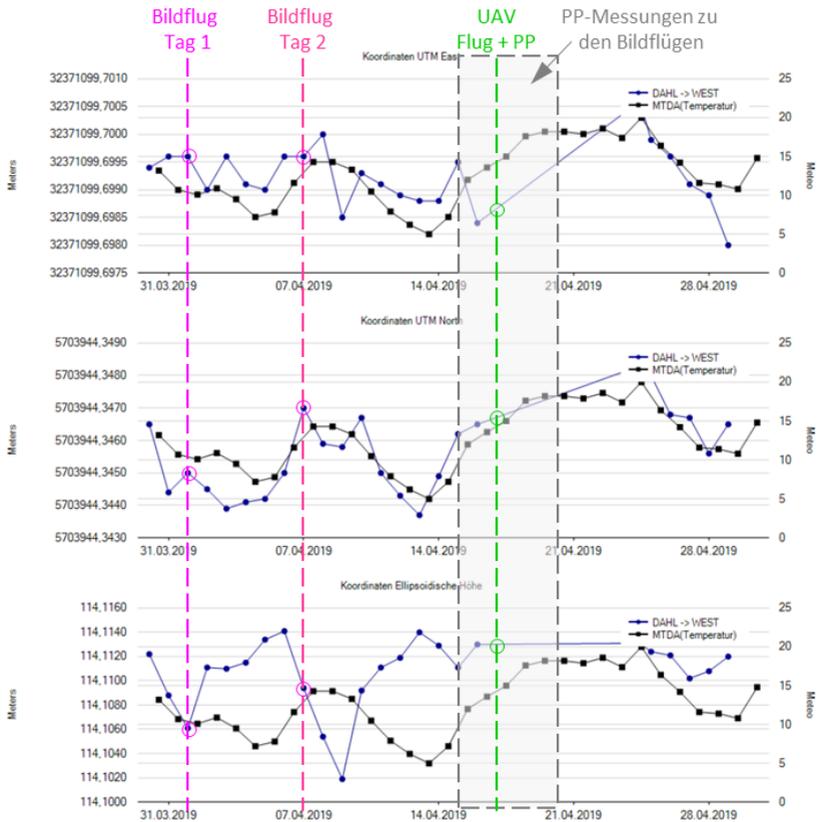
In Abbildung 12 sind die Ergebniszeitreihen einiger Referenzstationen des RAG FuE-Netzes einer Auswertung mit der GEO++ Post-Processing Software dargestellt. Dabei werden jeweils Tageslösungen berechnet, also über 24 Stunden gesammelt und gemittelt. Abgebildet sind keine absoluten UTM-Koordinaten, sondern jeweils der Änderungsbetrag zum Vortagsmittelwert (Differenzzeitreihe). Der abgebildete Datenzeitraum beginnt am 01.01.2019 und endet am 01.09.2019. Die Standardabweichungen der fünf dargestellten Koordinatenzeitreihen belaufen sich im Mittelwert auf UTM-Ost:  $\pm 1,3$  mm, UTM-Nord:  $\pm 1,1$  mm und ell. Höhe:  $\pm 2,3$  mm. Der aktuelle Auswertansatz sieht sogenannte „relaxed reference stations“ vor. Alle Referenzstationen erhalten eine a priori Standardabweichung, sodass der GNNET Auswertalgorithmus eine kleine stochastische Koordinatenunsicherheit zulässt. Damit kann trotz vorgegebener Koordinaten der Referenzstationen eine zwangsfreie Lösung gerechnet werden. Dennoch werden die Referenzstationskoordinaten über einen langen Zeitraum als stabil betrachtet.

Da das Referenznetz einmalig in das SAPOS-Netz eingerechnet wurde, sind individuelle Tagesgänge oder periodische Schwankungen der SAPOS- und/oder der Referenzstationen nicht auf den Zeitpunkt der Passpunktmessungen zu Befliegungen oder der Erfassung von Projektionszentren von Luftbildern abgebildet.



**Abbildung 12:** UTM-Koordinatenzeitreihen (Differenzen) einiger ausgewählter Referenzstationen des RAG FuE-Netzes bei Auswertung mit der Geo++ Post-Processing Software

Wie Abbildung 13 verdeutlicht, kommt es für die gemeinsame Nutzung zwischen diesen Datenebenen zu Koordinatendifferenzen, welche unter Umständen die für die Überwachungsaufgaben nötige Genauigkeit für Zeitreihenvergleiche und damit eine eindeutige Zuordnung von Einflussfaktoren stark beeinträchtigen kann. Hier werden beispielhaft die Koordinatendifferenzen einer Roverstation zu einer Referenzstation für den Zeitraum der Passpunktmessungen und der Bildflüge für den Altbergbaubereich (Aerophotogrammetrie und ALS) an der Ruhr 2019 gezeigt. Zudem sind in schwarz die Temperaturdaten eines Meteosensors dargestellt.



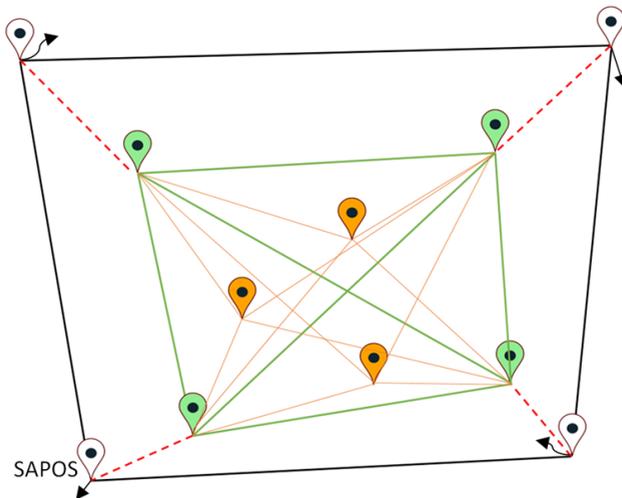
**Abbildung 13:** Zeitliche Gegenüberstellung verschiedener Messverfahren (zwei Bildflugtage, eine UAV-Befliegung sowie Passpunktmessungen) in Bezug zu einer beispielhaften GNSS-Station mit Darstellung der UTM-Koordinaten, ellipsoidischen Höhen sowie der Temperatur.

Für den Zeitraum vom 31.03. bis 01.05.2019 sind zwei Bildflugtage in Magenta-Farbtönen und in grau der dazugehörige Messzeitraum zur Passpunktbestimmung eingetragen. In grün zu sehen ist der Zeitpunkt einer in diesem Gebiet stattfindenden UAV-Befliegung über einem sanierten Tagesbruch, diese Passpunkte wurden am Flugtag gemessen. Im Rahmen des RAG FuE-Projektes wird der Ansatz der „relaxed reference stations“ überdacht und mit dem Einbringen des Zeitstempels neu umgesetzt.

### Schaffung eines stabilen Referenzrahmens mit dynamischer Netzausgleichung

Die klassische Herangehensweise an geodätische Monitoringaufgaben ist die Annahme eines stabilen Referenzrahmens über einen längeren Zeitraum (Nullmessung), wie in Abbildung 14 skizziert.

Dabei werden lokale Messungen (orange) oftmals an umliegende Bezugspunkte (grün) angeschlossen, welche wiederum, in zeitlich größeren Abständen, an äußere Referenzpunkte (weiß) (z.B.: SAPOS-Stationen) angeschlossen werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die lokalen Bezugspunkte über einen langen und die äußeren Referenzpunkte über einen sehr langen Zeitraum stabil sind. Auch die äußeren Bezugspunkte können jedoch Bewegungen unterliegen, welche unter der Annahme der Stabilität, auf die lokalen Messungen (Monitoringstationen) weiter projiziert werden.



**Abbildung 14:** Kaskadierende Gruppen von Mess- und Bezugspunkten der klassischen Herangehensweise eines geodätischen Monitorings mit Annahme eines stabilen Referenzrahmens.

Zur Auflösung ergeben sich zwei Schwerpunkte: Einerseits werden alle Punkte nach der Netzausgleichung einer Deformationsanalyse unterzogen, um verschobene Punkte zu detektieren und somit einen stabilen Referenzrahmen zu gewährleisten. Andererseits soll

das Konzept der zeitinvarianten Referenzstationskoordinaten überdacht werden. Das Ziel dieser neuen Herangehensweise ist es, die durch die Deformationsanalyse als verschoben detektierten Punkte nicht grundsätzlich aus der Netzauswertung auszuschließen, sondern das Bewegungsverhalten durch zeitvariante Koordinaten zu beschreiben. Mittels der Einführung von Bewegungsmodellen für Referenzstationen, werden deren Bewegungen nicht länger auf lokale Messungen/Monitoringstationen projiziert.

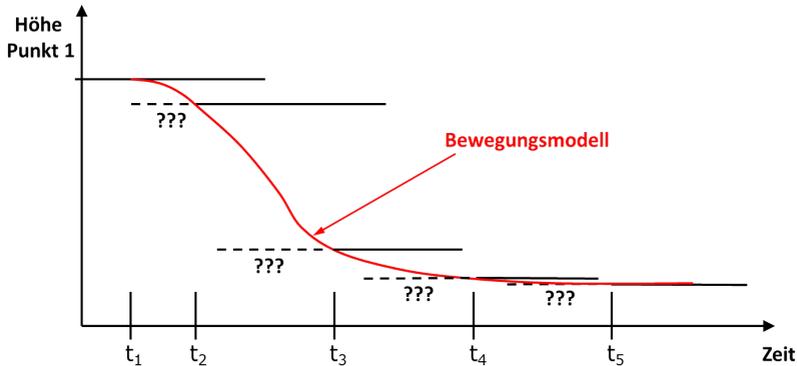
Für die Aufgabe der Schaffung eines festen Referenzrahmens sind die bei der GEOTEC GmbH seit Jahren entwickelten und softwaremäßig im Programmsystem PANDA umgesetzten Ansätze zur Ausgleichung geodätischer Netze und zur Kongruenzanalyse bei mehreren Messepochen so weiter zu entwickeln, dass die hier gestellten Herausforderungen gelöst werden können. Die bisher entwickelten mathematisch-statistischen Tests zum Nachweis von Deformationen beziehen sich auf klassische, qualitätsgesicherte Netze, bei denen die Messungen selbst oft in einem längeren Zeitraum erfolgen und deren Geometrie mit hinreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt wurde. Für kontinuierliche Monitoringnetze sind zunächst diese Ausgleichungsansätze zu erweitern, da jetzt z. B. bei GNSS-Messungen täglich ein Datensatz anfällt, der in sich und in Relation zu den weiteren Datensätzen analysiert werden muss. Besonderheiten im Bewegungsverhalten und Auffälligkeiten wie z. B. fehlerhafte Messungen müssen erkannt bzw. analysiert und dokumentiert werden.

Daneben ist das herkömmliche Konzept der Zuverlässigkeit zu erweitern. Hierzu ist eine Betrachtung der zeitlichen Abfolge der Messungen erforderlich, um hieraus Aussagen zur Verlässlichkeit der originären Messdaten abzuleiten.

Die Kernaufgabe besteht darin, die lokalen Messungen in einen festen Referenzrahmen einzubinden. Mit den bestehenden Algorithmen und Auswertestrategien der Kongruenzanalyse, die auch international dem Stand der Wissenschaft und Technik entsprechen, kann die Stabilität von Punkten bzw. Punktgruppen effizient überprüft werden. Allerdings ergibt sich für kontinuierliche Monitoringaufgaben die Notwendigkeit, über längere Zeiträume einen Bezugsrahmen mit hinreichend vielen Punkten vorzuhalten. Hier ist eine Methodik entwickelt worden, bestimmte Bewegungsmuster für eigentlich als stabil einzustufende Punkte aus den Daten (datengetriebener Ansatz) abzuleiten und als Bewegungsmodell (z. B. Offset oder linear) für diese Punkte einzuführen. Damit können diese Punkte weiterhin als Referenzpunkte verwendet werden und verstärken dadurch den Bezugsrahmen. Für die Fragestellungen in diesem FuE-Projekt sollen und können die das zentrale Ruhrgebiet umfassenden SAPOS-Permanentstationen von Geobasis NRW diese Referenzpunkte bilden. Allerdings wird das vom amtlichen Vermessungswesen verfolgte Konzept von Festpunkten mit einmal definierten fixen Koordinaten hier aufgegeben. Es wird die Stabilität der SAPOS-Stationen überprüft und – wenn es geeignet erscheint – ein einfaches Bewegungsmodell abgeleitet, damit die Gruppe der insgesamt doch wenigen SAPOS-Stationen nicht unnötig ausgedünnt wird.

Ein wichtiger Aspekt bzw. Herausforderung bei der Bestimmung von absoluten Bewegungen ist das bisher im Marscheidewesen und in der Geodäsie gebräuchliche Konzept des Arbeitens mit zeitinvarianten Koordinaten, d. h. mit Koordinatenwerten, die für einen bestimmten Zeitraum als fix angesehen werden: Nach der Bestimmung von Lagekoordinaten und/oder Höhen zum Zeitpunkt  $t_1$  werden die jetzt ermittelten „besten“ Werte

als gültig angesehen, bis sie zu einem späteren Zeitpunkt  $t_2$ ,  $t_3$ , ... im Rahmen einer erneuten Messung neu bestimmt und dann wieder für die Zukunft als „gültig“ angesehen werden.



**Abbildung 15:** Höhenverhalten eines Punktes, beschrieben durch eine Abfolge von festen Höhenwerten oder durch ein zeitliches Bewegungsmodell.

In Abb. 15 ist skizziert, dass durch solch ein Vorgehen die zeitliche Veränderung von Punkten bzw. der gesamten Tagesoberfläche nicht adäquat abgebildet werden kann. Wird nun, wie derzeit im amtlichen Vorgehen zum Zeitpunkt  $t_2$  etwa festgestellt, dass sich die Höhe eines Punktes verändert hat, so wird ein neuer Höhenstatus eingeführt. Man hat jedoch keinerlei Information darüber, wann genau sich diese Höhe geändert hat, z. B. direkt nach der ersten Messung, unmittelbar vor der zweiten Messung oder irgendwann dazwischen. Es erscheint notwendig zu werden, eine zeitvariable Beschreibung von Lage- und Höhenkoordinaten zu entwickeln, d. h. Möglichkeiten zu schaffen, Koordinaten nicht mehr als zeitinvariant zu betrachten, vielmehr mit einer zeitlichen Komponente zu versehen, also quasi als Zeitfunktionen aufzufassen. Bei mehreren Messepochen kann ggf. aus den Ergebnissen selbst ein zeitliches Bewegungsmodell abgeleitet werden. Oder es gelingt, das räumlich-zeitliche Bewegungsverhalten komplex zu modellieren, wie es im weiteren Verlauf des FuE-Projektes angestrebt wird.

In jedem Fall setzen diese Konzepte voraus, dass an der Darstellung von Koordinaten in Auswertesystemen und Datenbanken eine entscheidende Veränderung vorgenommen wird: Die bisherige Abspeicherung von  $x$ ,  $y$  und  $z$  oder von Rechts- und Hochwerten sowie Höhe für die drei Komponenten der Position eines Punktes ist nicht länger hinreichend. Es ist notwendig, für jede Koordinatenbestimmung einen Zeitstempel aufzunehmen, wie es bei der RAG seit zehn Jahren erfolgt (KAMPHANS, K. ET AL. 2008), und ein Bewegungsmodell in der Datenhaltung vorzusehen. Die Art des Bewegungsmodells ist dabei weitgehend offen zu halten. Diese Erweiterung der Grundstruktur für die Basisinformation eines Punktes setzt Änderungen in den Datenbanken und Datenportalen voraus.

## Zusammenfassung unterschiedlicher Sensoren - mit und ohne MSST

Zunächst einmal sind die Ergebnisse der vielfältigen Sensoren gemeinsam zu betrachten d. h. zeitlich und örtlich zusammenzufügen. Mittels Nivellement und GNSS werden primär punktbezogene Veränderungen aufgedeckt, mittels der Photogrammetrie, des Laserscannings und der Radarinterferometrie aber eher flächenbezogene Informationen. Es wird an Konzepten gearbeitet, wie diese Einzelergebnisse sinnvoll zusammengefügt werden können. Dabei ist zwischen zwei grundsätzlichen Herangehensweisen zu unterscheiden:

Für eine strenge Zusammenführung der Information verschiedener Sensoren können z. T. existierende algorithmische Konzepte genutzt werden. In PANDA ist die gemeinsame Ausgleichung von Messdaten bestimmter Sensoren realisiert. Dieser Ansatz setzt allerdings voraus, dass sich die Messungen auf identische physikalische Realisierungen von Messpunkten beziehen. Das ist in der Praxis sehr häufig nicht gegeben, z. B. bei der Nutzung von InSAR mit GNSS und Nivellements.

Wenn es, wie derzeit an der Ruhr, keine eindeutig zuzuordnenden Messpunkte wie demnächst mit den MSST an der Saar gibt, bleibt nur die Einführung von Suchradien für die Definition von erweiterten Punktidentitäten. Weitergehende Ansätze sind dabei die Bestimmungen von Flächenfunktionen, welche die Veränderungen etwa der Tagesoberfläche mathematisch approximieren. Als mathematische Flächenfunktion sind lokale Splines möglich, z. B. b-Splines oder NURBS. Alternativ können auch Radiale Basisfunktionen (RBF) genutzt werden, die einfacher anzuwenden sind als die Splines. Mittels RBFs sollte es möglich sein, auch abklingende Bewegungen zu erkennen bzw. zu beschreiben.

Daneben erlauben geostatistische Methoden die flächenhafte Beschreibung des Verhaltens eines Untersuchungsgebietes. Dazu wird ein Raster z. B. mittels Kriging mit anschließender Interpolation berechnet. Vereinfacht ausgedrückt werden bei den geostatistischen Methoden die Bewegungsraten der einzelnen Sensoren georeferenziert und dann gegebenenfalls mit Gewichtung und Korrelationsanalyse für einzelne Betrachtungseinheiten, z. B. Kacheln von 1 km x 1 km, 100 m x 100 m oder sogar deutlich kleiner zusammengefügt. Dies setzt natürlich voraus, dass das Bezugssystem für die einzelnen Sensoren identisch und stabil ist.

In einem ersten Schritt sind in der Kooperation der GEOTEC und der ALLSAT GmbH Möglichkeiten diskutiert und vorangetrieben worden, wie die Einzelergebnisse unterschiedlicher Sensoren in das ALLSAT-Portal GLOMON integriert werden können. Derzeit erweist sich der geostatistische Ansatz als eher umsetzbar, wobei auf die strenge algorithmische Lösung im Moment noch nicht völlig verzichtet werden soll.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die einzelnen Sensorkomponenten einer Multisensor-Referenzstation (MSST), das sind der Doppel-Corner-Reflektor (Doppel-CR), die permanent registrierende Zweifrequenz-GNSS-Station sowie die Nivellementsunkte zum Anschluss an das Landeshöhennetz, haben in den vorgestellten Testreihen ihre grundsätzliche Eignung als Referenzen gezeigt:

Der Prototyp des Doppel-CR ist sehr gut in Sentinel-1 Ascending- und Descending- sowie in TerraSAR-X Ascending-Radarsatellitendaten erkennbar.

Die Lagegenauigkeit des Doppel-CR ist sehr robust gegenüber Blickwinkeländerungen der Radarsatelliten und erreicht eine Abweichung des Zentrums von 2 cm erst ab  $\geq 20$  Gon Winkeländerungen in Azimut und Elevation.

Die GNSS-Messungen über dem Doppel-CR haben keine signifikanten Mehrwegeeffekte gezeigt, so dass die GNSS-Messungen als unbeeinflusst gelten können.

Die MSST wurden von der RAG für sechs Standorte konfektioniert, die im Jahr 2020 an der Saar installiert werden. Somit besteht hier die Möglichkeit, aus permanenten GNSS-Messungen, Präzisionsnivellements, PSI-Auswertungen aus C-Band Radarsatellitendaten und Meteo-Daten, die in dem GLOMON-Portal der ALLSAT GmbH eingebrachten Ausgleichungsansätze der zeitvarianten Referenzsysteme der GEOTEC GmbH zu testen und zu validieren. Für den Bereich der RAG an der Ruhr soll über neun Stationen das MSST-Konzept bis Ende 2022 umgesetzt werden.

## Literatur

- AIRBUS D&S (2020) : AIRBUS D&S: <https://www.intelligence-airbusds.com/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- ALLSAT (2020): <http://www.allsat.de>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- BBD (2020): <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/>. Aufgerufen am 13.01.2020.
- BGR (2020): <https://www.geozentrum-hannover.de/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- DLR (2020): <https://www.dlr.de/eoc/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- GEO++ (2020): <http://www.geopp.de/de/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- GEOBASIS NRW (2020): [https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/geobasis/index.html](https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/index.html). Aufgerufen am 12.01.2020.
- GEOTEC (2020): <https://www.geotec-gmbh.de>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- GLOMON (2020): <https://www.global-monitoring.net/>. Aufgerufen am 20.01.2020.
- GNNET (2020): <http://www.geopp.de/de/gnnet/>. Aufgerufen am 20.01.2020.
- GNREF (2020): <http://www.geopp.de/de/gnref/>. Aufgerufen am 20.01.2020.
- IGMC (2020): <https://www.igmc.tu-clausthal.de/>. Aufgerufen am 14.01.2020.
- LVGL (2020): [https://www.saarland.de/vermessung\\_geoinformation\\_landentwicklung.htm](https://www.saarland.de/vermessung_geoinformation_landentwicklung.htm). Aufgerufen am 12.01.2020.
- OBA (2020): <https://www.saarland.de/7809.htm>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- PANDA (2020): <https://www.geotec-gmbh.de/panda/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- RAG (2020): <http://www.rag.de>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- THGA (2020): <https://fzn.thga.de/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- WASOFT (2020): <http://www.wasoft.de/>. Aufgerufen am 12.01.2020.
- WAPNET (2020): <http://www.wasoft.de/netz/index.html>. Aufgerufen am 12.01.2020.

- ADAM, N. ET AL. (2020): Neues Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“. In: 40. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 4.-6. März 2020, Stuttgart.
- BUSCH, W. & ENGEL, T. (2018): Landesweite, radarinterferometrische Bodenbewegungserfassung auf Grundlage von Sentinel-1-Daten – Verfahrensweise und Ergebnisse am Beispiel des Saarlandes. Tagungsband GeoMonitoring 2018, 1.-2. März 2018, Clausthal-Zellerfeld, S. 11-25. ISBN 978-3-869486-27-7.
- HAGER, S. & WOLLNIK, F. (2016): Mine Surveying and Post-Mining Activities of RAG Aktiengesellschaft / Markscheidewesen und Altbergbau der RAG Aktiengesellschaft. Mining Report Glückauf - Fachzeitschrift für Bergbau, Rohstoffe und Energie, No. 3, 152. Jahrgang, Juni 2016, S. 224-232. Verlag Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Herne. ISSN 2195-6529.
- JOECKEL, R. & STOBER, M. (1991): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung. Konrad Wittwer Verlag, 1991, ISBN 3-87919-150-6.
- KALIA, A.-C.; FREI, M.; LEGE, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. Remote Sens. Environ., 22, S. 234-249, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.015>.
- KAMPHANS, K.; WALTER, D.; HANNEMAN, W.; BUSCH, W.; SPRECKELS, V.; VOSEN, P. (2008): GIS-Einsatz im Monitoring bergbaubedingter Oberflächenbewegungen. Beiträge zum 20. AGIT-Symposium Angewandte Geoinformatik, Salzburg, AUT, 2.-4. Juli 2008. Wichmann Verlag, S. 572-577. ISBN 978-3-87907-464-8.
- RIECKEN, J.; KRICKEL, B.; GEFELLER, V.; REIFENRATH, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In Zeitschrift für Geodäsie, Geo-Information und Landmanagement (zfv) 6/2019, 144. Jg., Wißner Verlag, S. 354-361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- ROSNER, P, HEITFELD, M, SPRECKELS, V., VOSEN, P. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier. In: Tagungsband zum 5. RuhrGeo-Tag 2014, , Bochum, 27.03.2014, S. 153-177.
- RUDOLPH, T.; GOERKE-MALLET, P.; JANZEN, A.; MÜTERTHIES, A.; PAKZAD, K.; TEUWSEN, S.; YANG, C.-H.; SPRECKELS, V.; VEHLING, L. (2020): Bergbaumonitoring im südlichen Ruhrgebiet. Tagungsband GeoMonitoring 2020, 12.-13. März 2020, Braunschweig, dieser Tagungsband.
- SCHÄFER, T., SCHÄFER, M., BUSCH, W., DIETZEL, H.-J. (2008): Einsatz der differentiellen Radarinterferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen im Bereich einer Erdöllagerstätte im westlichen Emsland. In: 9. Geokinematischer Tag, 8.-9. Mai 2008, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2008-1, S. 66–74. VGE Verlag GmbH, Essen 2008.
- SPRECKELS, V., SCHULZ, M.; BECKER, A.; DROBNIENSKI, M. (2016): GNSS-Monitoring von Bodenbewegungen. Tagungsband GeoMonitoring 2016, 3.-4. März 2016, Braunschweig, S. 21-34. ISBN 978-3-926146-26-7.
- SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A., GREIWE, A., EBERHARDT, L. (2016 B): Eignung von ALS, Aero-und UAS-Photogrammetrie zur Früherkennung und Erfassung von Tagesbrüchen. 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Band 25, 7.-9. Juni 2016, Bern, CH, S. 97-112. ISSN 0942-2870.

- SPRECKELS, V.; BECHERT, S.; SCHLIENKAMP, A.; DROBNIIEWSKI, M.; SCHULZ, M.; SCHÄFER, F. (2018): Aufbau einer GNSS Referenzstations-Infrastruktur für das GeoMonitoring von Bodenbewegungen. Tagungsband GeoMonitoring 2018, 1.-2. März 2018, Clausthal-Zellerfeld, S. 241-257. ISBN 978-3-869486-27-7.
- TENGEN, D.; RIEDEL, A.; RIEDEL, B.; GERKE M.; NIEMEIER, W. (2019): Ableitung vertikaler Landbewegung an der deutschen Nord- und Ostseeküste aus GNSS- und PS-Auswertungen. Tagungsband GeoMonitoring 2019, 14.-15. März 2019, Hannover, S. 121-133. DOI: <https://doi.org/10.15488/4517>.
- YIN, X. & BUSCH, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. Tagungsband GeoMonitoring 2018, 1.-2. März 2018, Clausthal-Zellerfeld, S. 119-138. ISBN 978-3-869486-27-7.

## **Kontakt**

VOLKER SPRECKELS

STEFFEN BECHERT

ANDREAS SCHLIENKAMP

MICHAEL DROBNIIEWSKI

RAG Aktiengesellschaft  
Im Welterbe 10  
45141 Essen

MICHAEL SCHULZ

FLORIAN SCHÄFER

EVA KEMKES

JÜRGEN RÜFFER

ALLSAT GmbH  
Sokelantstraße 5  
30165 Hannover

WOLFGANG NIEMEIER

DIETER TENGEN

GEOTEC GmbH  
Heinrich-Heine-Weg 69  
30880 Laatzen

THOMAS ENGEL

MICHAEL MÜLLER

PERDITA SCHMITT

LVGL Saarland  
Von der Heydt 22  
66115 Saarbrücken