

Dynamische Netzausgleichung – zeitvariante Koordinaten für GNSS- Referenzstationen

Dynamic Network Adjustment – Time-varying Coordinates for GNSS Reference Stations

Florian Schäfer, Wolfgang Niemeier, Jürgen Rüffer, Michael Schulz, Volker Spreckels, Dieter Tengen

Die geometrische Überwachung der Tagesoberfläche in den vom untertägigen Steinkohlenbergbau beeinflussten Gebieten ist eine Aufgabe der RAG Aktiengesellschaft (RAG). Dabei kommen verschiedene Sensoren und Verfahren, wie Nivellement, GNSS, Aerophotogrammetrie und InSAR zum Einsatz. Diese Messverfahren benötigen einen stabilen Referenzrahmen, um auf Basis von Folgemessungen auf Bodenbewegungen schließen zu können. Dabei besteht das grundsätzliche Problem, dass sich die Geometrie der Tagesoberfläche weiterhin großräumig verändert und auch vermeintlich stabile Referenzpunkte Bewegungen unterworfen sind. Unter diesen Gesichtspunkten wurde 2019 ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt durch die RAG gestartet, welches sich mit dem Aufbau und der Einrichtung eines hochgenauen GNSS-Monitoringnetzes für die Bereiche des Grubenwasseranstiegs und des Altbergbaus beschäftigt. Ein Schwerpunkt des Projekts war und ist die Realisierung und Aufrechterhaltung eines konsistenten, stabilen Referenzrahmens. Um die Gruppe der stabilen Referenzpunkte über die Jahre nicht stetig aufgrund der Bodenbewegungen zu reduzieren, wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, der Bewegungsmuster für instabile Referenzstationen ableitet und diese somit weiterhin für den Referenzrahmen nutzbar macht. Eine Erprobung dieser Konzepte erfolgte mit Realdaten von SAPOS- und RAG-Stationen in Nordrhein-Westfalen für einen Zeitraum von ca. drei Jahren.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Einführung von zeitlich veränderlichen (zeitvarianten) Koordinaten für die GNSS-Stationen. Diese Methode ersetzt das seit Jahrzehnten im Vermessungs- und Markscheidewesen gebräuchliche Konzept von festen (zeitinvarianten) Koordinatenwerten für Referenzpunkte, welche üblicherweise für einige Jahre oder sogar Jahrzehnte festgeschrieben werden. Die Beschreibung der zeitvarianten Koordinaten erfolgt durch Bewegungsfunktionen, die aus einer mehrstufigen Analyse langjähriger GNSS-Zeitreihen abgeleitet werden.

Die im Rahmen des FuE-Projekts durch die GEOTEC GmbH entwickelten Methoden wurden in das aktive GNSS-Monitoring eingebunden, welches mithilfe des GLOMON-Portals der ALLSAT GmbH bereits seit 2017 erfolgt.

Schlüsselwörter: Monitoring, GNSS, Bodenbewegungen, Referenzpunkte

The ground movement behaviour in areas affected by underground hard coal mining is an obligation of RAG Aktiengesellschaft (RAG). For that, various sensors and methods such as levelling, GNSS, aero photogrammetry and InSAR are used. These measurement methods require a stable reference frame in order to be able to indicate ground movements based on remeasurement. The fundamental problem here is that the surface geometry changes continuously and supposedly stable reference points are exposed to ground movements as well. Therefore, the RAG started a research and development project in 2019

to build and establish a high-precision GNSS monitoring network for areas with mining water rise and former mining sites.

One project focus includes the realisation and maintenance of a consistent and stable reference frame. In order to prevent the quantity of stable reference points from continuous reduction due to ground movements, a methodical approach that derives movement patterns for unstable reference stations to maintain their usability for the reference frame has been developed. These concepts were tested with real data received from SAPOS and RAG GNSS stations in North Rhine-Westphalia over a period of three years.

One further topic is the implementation of time-varying coordinates for GNSS stations. This method replaces the concept of fixed reference points set for several years, which has been used in surveying for decades. Movement functions derived from multi-level analyses of long-term GNSS time series set the definition of time-varying coordinates.

The methods developed by GEOTEC GmbH as part of this R&D project have been integrated into GNSS monitoring accomplished by ALLSAT GmbH since 2017 through GLOMON.

Keywords: *Monitoring, GNSS, ground movement, reference points*

1 HINTERGRUND

Der Nachweis des Bewegungsverhaltens der Tagesoberfläche in den vom untertägigen Steinkohlenbergbau beeinflussten Gebieten ist eine Daueraufgabe der RAG Aktiengesellschaft (RAG). Durch den jahrhundertelangen großflächigen und z.T. sehr intensiven Kohleabbau traten in den Bergbaurevieren in Nordrhein-Westfalen (Ibbenbüren & Ruhrgebiet) und im Saarland auch nach Ende des aktiven Bergbaus Bodenbewegungen auf. Die vom kontrollierten Grubenwasseranstieg betroffenen Bereiche werden durch betriebliche und behördlich angeordnete Überwachungen begleitet. Die neuen, innovativen Bewegungs- und Verformungsmodelle sollen zur Verifikation von Bodenbewegungen herangezogen werden.

Bei allen diesen Aufgaben gibt es eine grundsätzliche Herausforderung: Die Geometrie der Tagesoberfläche verändert sich weiterhin großflächig; geometrisch stabile Bereiche befinden sich somit i. d. R. nur außerhalb dieses Gebiets. Die klassische Herangehensweise an geodätische Deformationsmessungen ist die Schaffung eines Referenzrahmens aus einer gewissen Anzahl an Punkten, welche als stabil eingestuft werden. Durch Folgemessungen können auf deren Basis Objektveränderungen detektiert werden. Vor allem im GNSS-Monitoring ist die Annahme der Stabilität der Referenzstationen über einen langen Zeitraum hinweg üblich, jedoch kritisch zu betrachten. Begründet durch die Notwendigkeit von möglichst kurzen Basislinien zwischen Referenz- und Monitoringstationen befindet sich der als stabil betrachtete Bereich oftmals in der Nähe der Überwachungsbereiche. Bewegungen der Referenzstationen können also unerkannt bleiben, sodass ihre Bewegungen folglich auf die Monitoringstationen projiziert werden.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde 2019 ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt (FuE) durch die RAG gestartet, welches sich mit dem Aufbau und der Einrichtung eines hochgenauen GNSS-Monitoringnetzes für die Bereiche des Grubenwasseranstiegs und des Altbergbaus beschäftigte. Ziel dieses Projekts war es, die Ergebnisse der GNSS-Monitoringnetze und später auch Informationen weiterer Sensoren in einem einheitlichen und über die Zeit stabilen Referenz-

rahmen vorzuhalten, damit die detektierten Bewegungen die absoluten Veränderungen der Tagesoberfläche darstellen.

Bereits seit 2014 betreibt die RAG gemeinsam mit der ALLSAT GmbH (ALLSAT) lokale GNSS-Referenz- und Monitoringstationen. Diese Netze sind in den letzten Jahren stetig gewachsen und zählen mittlerweile 18 Stationen an der Ruhr, 6 Stationen in Ibbenbüren sowie 6 Multisensor-Referenzstationen an der Saar /Spreckels et al. 2020/. Erweitert werden die Netze durch SAPOS-Stationen in Nordrhein-Westfalen und in Niedersachsen sowie im Saarland mit angrenzenden französischen RGN-Stationen. Die Daten werden im Monitoringportal GLOMON der ALLSAT vollautomatisiert aufbereitet, im Post-Processing ausgewertet und die Ergebnisse visualisiert. In diesen bestehenden Prozess sollen sämtliche neuen Erweiterungen des Programmsystems PANDA der GEOTEC GmbH (GEOTEC) integriert werden, die im Zuge des FuE-Vorhabens realisiert wurden.

2 SCHAFFUNG EINES STABILEN REFERENZRAHMENS

Die klassische Herangehensweise für geodätische Monitoringaufgaben ist die Annahme eines stabilen Referenzrahmens über einen längeren Zeitraum (Jahre bis Jahrzehnte). Für die Netzpunkte dieses Rahmens werden in einer Nullmessung die Koordinaten festgelegt, auf Stabilität überprüft und ggf. beibehalten.

Wie in *Abb. 1* skizziert, ist für die eigentlichen Messungen zum Nachweis von Veränderungen ein gestuftes Vorgehen üblich: Lokale Messungen (orange) in der bewegungsaktiven Zone werden recht häufig wiederholt, um die erwarteten Bewegungen zeitnah und möglichst vollständig zu erfassen. Im Falle der Monitoringaufgaben der RAG sind diese Messungen beispielsweise über Präzisionsnivelementlinien, GNSS-Monitoringstationen sowie Passpunktmessungen für großflächige aerophotogrammetrische und lokale Copter-Befliegungen realisiert. Diese lokalen Messpunkte werden an

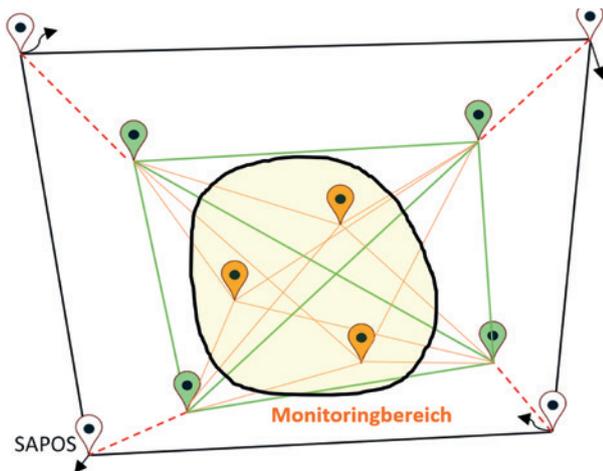


Abb. 1 | Kaskadierende Gruppen von Mess-, Bezugs- und Referenzpunkten in einem klassischen Monitoringprojekt mit Untersuchungsobjekt im zentralen Bereich (nach /Spreckels et al. 2020/)

umliegende Bezugspunkte (grün) angeschlossen, welche wiederum, oft in zeitlich größeren Abständen, mit äußeren Referenzpunkten (weiß) kontrolliert werden.

Dabei wird auch für die Punktstabilitäten von einem kaskadierenden Ansatz ausgegangen:

- Die äußeren Referenzpunkte werden über einen sehr langen Zeitraum als stabil angesehen.
- Die (mittleren) Bezugspunkte für die lokalen Messungen sollen außerhalb des eigentlichen Monitoringgebiets liegen und über einen gewissen Zeitraum stabil sein.
- Die lokalen Messungen befinden sich in einem instabilen Gebiet, d. h. für diese Punkte werden fortlaufend Punktveränderungen angenommen.

Das Problem besteht darin, dass auch die Referenzpunkte Bewegungen unterliegen, da es auf der Erdoberfläche keine absolute Stabilität gibt. Werden die realen Veränderungen dieser äußeren Referenzpunkte nicht korrekt auf die (mittleren) Bezugspunkte und die lokalen Messungen projiziert, so werden deren Ergebnisse verfälscht, d. h. die ermittelten Bewegungen für das zu überwachende Gebiet können nicht verlässlich bestimmt werden.

Folglich war eine der Herausforderungen innerhalb des FuE-Vorhabens die Schaffung eines Rahmens von stabilen Referenzpunkten. Unter diesen Gesichtspunkten wurden bisherige von der GEOTEC entwickelte mathematisch-statistische Testmethoden und Auswertestrategien im Hinblick auf neuartige kontinuierlich registrierende Monitoringsysteme weiterentwickelt. Die Herausforderung besteht darin, dass bei längeren Monitoringprojekten innerhalb des Referenzrahmens sehr häufig kleinere Bewegungen (Punktunruhen) sowie größere Veränderungen bei Einzelpunkten registriert werden können /Niemeier et al. 2020/. Diese führen im klassischen Konzept oftmals zu einer kritischen Reduktion der Zahl stabiler Referenzpunkte.

Aus diesem Grund sollen die als verschoben detektierten Punkte nicht einfach aus der Gruppe der Referenzpunkte ausgeschlossen werden. Stattdessen wird versucht, bestimmte Bewegungsmuster für Referenzpunkte aus den Messdaten heraus abzuleiten und als Bewegungsmodell für diese Punkte einzuführen. Damit können

diese Punkte weiterhin in der Gruppe der Referenzpunkte verbleiben und verstärken dadurch den Bezugsrahmen. Das angewandte Konzept zum Erkennen von Bewegungsmustern für wiederholt bestimmte Referenzpunkte basiert auf dem in *Abb. 2* skizzierten Vorgehen und ist erstmals in /Tengen et al. 2019/ publiziert worden. Exemplarisch sind die Ergebnisse für eine fortlaufende Analyse von Koordinatensätzen der Jahre 2010–2014 wiedergegeben.

Im Zuge des Epochenvergleichs wird im Jahr 2011 eine signifikante Veränderung für Punkt 1 in Relation zur Position in Epoche 2010 (Nullepoche) analysiert. Als verschoben erkannte Punkte scheiden für die Folgejahre aus der Gruppe der stabilen Referenzpunkte aus. Es werden immer alle Folgeepochen mit der Nullepoche, hier die Epoche 2010, verglichen. Im Jahr 2012 wird Punkt 3 als verschoben erkannt. Im Jahr 2013 tritt für Punkt 3 eine etwas andere, aber wieder signifikante Verschiebung auf. Zusätzlich wird auch eine signifikante Veränderung für Punkt 8 erkannt. Im Jahr 2014 ergibt sich für Punkt 3 eine wieder etwas andere, ebenso signifikante Veränderung. Die Position des Punkts 8 entspricht der Position in Epoche 2013.

Die Punkte 2, 4, 5, 6, 7, 9 und 10 bilden ein stabiles Teilnetz. Es werden alle Epochen auf diese Punkte transformiert, dabei werden die Koordinaten der Epoche 2010 als Referenz verwendet. Aus den transformierten Koordinaten wird ein Bewegungsmodell der Punkte abgeleitet. Das Bewegungsmodell wird für jede Koordinatenachse getrennt berechnet, die Standardabweichungen der Punkte werden



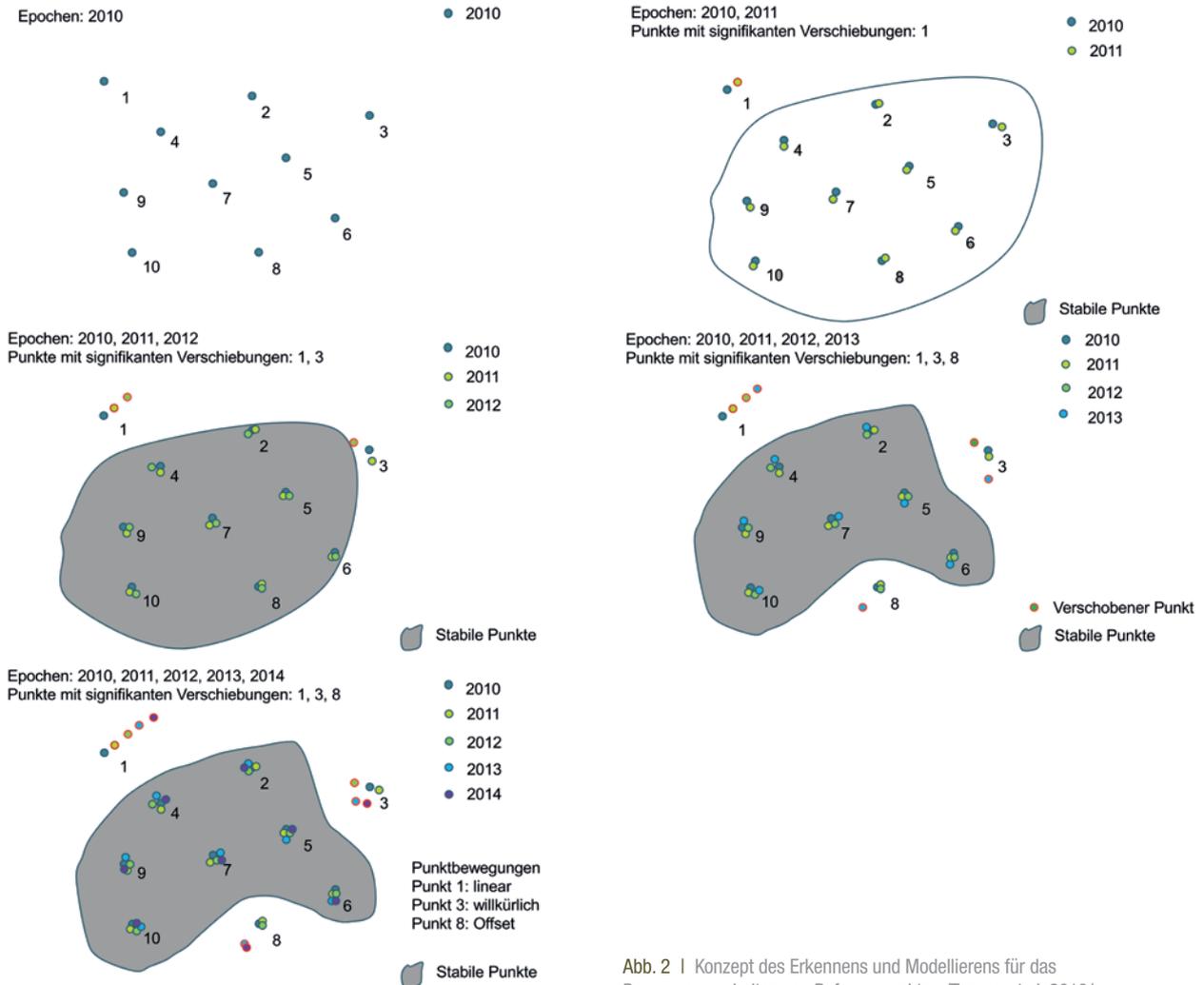


Abb. 2 | Konzept des Erkennens und Modellierens für das Bewegungsverhalten von Referenzpunkten /Tengen et al. 2019/

berücksichtigt und eventuelle Ausreißer detektiert. Das Modell beschreibt lineare und saisonale Bewegungen sowie Offsets. Eine Erweiterung der Modelle ist möglich, siehe Abschnitt 5.

Für das Beispiel in *Abb. 2* können nun folgende Bewegungsmuster abgeleitet werden: Für Punkt 1 ergibt sich eine lineare Veränderung. Für Punkt 8 kann von einem Offset zwischen 2012 und 2013 ausgegangen werden. Punkt 3 weist willkürliche Bewegungen auf und scheidet somit aus der Gruppe der Referenzpunkte aus. Die Entscheidung, ob ein als verschoben erkannter Punkt ein bestimmtes Bewegungsverhalten oder eine willkürliche Bewegung aufweist, basiert auf der Standardabweichung aus der Zeitreihenanalyse. Wird ein gegebener Grenzwert für alle Koordinatenachsen unterschritten, gilt das Bewegungsverhalten des Punkts als bestimmbar, ansonsten ist das Bewegungsverhalten des Punkts willkürlich und der Punkt wird als instabil betrachtet. Die Epochenvergleiche werden erneut gestartet. Für die Punkte 1 und 8 werden nicht die Koordinaten der Epoche

2010 verwendet, sondern die aus dem Bewegungsmodell für den Zeitpunkt der Folgeperiode abgeleiteten Koordinaten. Bei den Epochenvergleichen wird jeweils die komplette Kovarianzmatrix beider Epochen berücksichtigt.

Der Vorteil des Verfahrens ist, dass durch den Epochenvergleich eine statistisch begründete Aussage über die stabilen Punkte getroffen werden kann und die Punktbelegungen der als verschoben

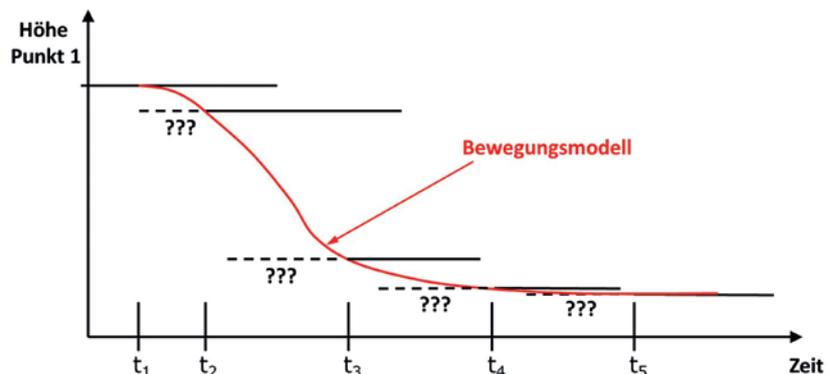


Abb. 3 | Höhenverhalten eines Punkts, beschrieben durch eine Abfolge von festen Höhenwerten oder durch ein zeitliches Bewegungsmodell

erkannten Punkte sich auf diese stabilen Punkte beziehen. Bei einer gemeinsamen Auswertung von Transformationsparametern der Epochen und der Bewegungsmodelle der Punkte ist die Unterscheidung zwischen stabilen und instabilen Punkten schwieriger.

3 ZEITVARIANTE KOORDINATEN

Ein Hindernis bei der Bestimmung von absoluten Bewegungen ist das bisher im Markscheidewesen und in der Geodäsie gebräuchliche Konzept des Arbeitens mit festen, oder anders gesagt, zeitinvarianten Koordinaten. Das heißt, mit Koordinaten, die für einen bestimmten Zeitraum als fix angesehen werden. Nach der Bestimmung von Lagekoordinaten und/oder Höhen werden die ermittelten Werte als gültig angesehen, bis sie zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen einer erneuten Messung und Ausgleichung neu bestimmt und dann z.B. durch die zuständige Vermessungsbehörde für die Zukunft für gültig erklärt werden.

Am Beispiel von Abb. 3 wird nach der klassischen Vorgehensweise zu jedem neuen Messungszeitpunkt t_i ein neuer Höhenwert eingeführt. Es gibt jedoch keinerlei Informationen darüber, wann genau sich die Höhe geändert hat und wie das Verhalten zwischen den Messzeitpunkten war.

Aus den oben genannten Gründen wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens eine zeitvariante Beschreibung von Koordinaten entwickelt, d.h. die Referenzpunktkoordinaten werden mit einer zeitlichen Komponente versehen. Auf Basis der kontinuierlich erfassten Messdaten eines GNSS-Monitoringnetzes kann aus den Ergebnissen ein zeitliches Bewegungsmodell für Referenzstationen abgeleitet werden.

4 UMSETZUNG IN GLOMON FÜR DAS MONITORING DES RUHRGEBIETS

Das Monitoringportal GLOMON der ALLSAT wird seit 2017 für die Prozessierung und Ergebnisaufbereitung von GNSS-Monitoring- und Referenzstationen der RAG eingesetzt. Die im Rahmen des FuE-Vorhabens durch die GEOTEC entwickelten Methoden für das Programmsystem PANDA wurden erfolgreich in GLOMON eingebunden und werden weiterhin im derzeitigen aktiven und zukünftig weiter ausgebauten FuE-Monitoringnetz für das Ruhrgebiet (s. Abb. 4) angewendet.

In /Spreckels et al. 2020/ ist für die Realisierung von Monitoringaufgaben mit unterschiedlichen Messverfahren und damit auch Messzeitpunkten sehr anschaulich dargelegt, welche Probleme auftreten, wenn keine verlässlichen aktuellen Informationen über die jeweils gültigen Koordinaten der Referenz- oder lokalen Bezugspunkte vorliegen.

Wie in Abb. 5 verdeutlicht, kommt es gemäß /Spreckels et al. 2020/ „zu Koordinatendifferenzen, wenn die Variabilität der GNSS-Anschlusspunkte nicht oder nicht zutreffend berücksichtigt wird. Für den Zeitraum vom 31.03. bis 01.05.2019 sind zwei Bildflugtage in Magenta-Farbtönen eingetragen und in Grau der dazugehörige Messzeitraum zur Passpunktbestimmung. In Grün zu sehen ist der Zeitpunkt einer in diesem Gebiet stattgefundenen UAV-Befliegung über einem sanierten Tagesbruch; diese Passpunkte wurden am Flugtag gemessen.“

Da das Referenznetz einmalig in das SAPOS-Netz eingerechnet wurde, sind individuelle Tages- oder periodische Schwankungen der SAPOS- und/oder der RAG-Referenzstationen nicht auf den Zeitpunkt der Passpunktmessungen oder auf die Erfassung von Projektionszentren von Luftbildern abgebildet. Gemäß Abb. 5 kommt es



Abb. 4 | Übersicht des FuE-Netzes in NRW, bestehend aus SAPOS-Stationen und RAG-Stationen

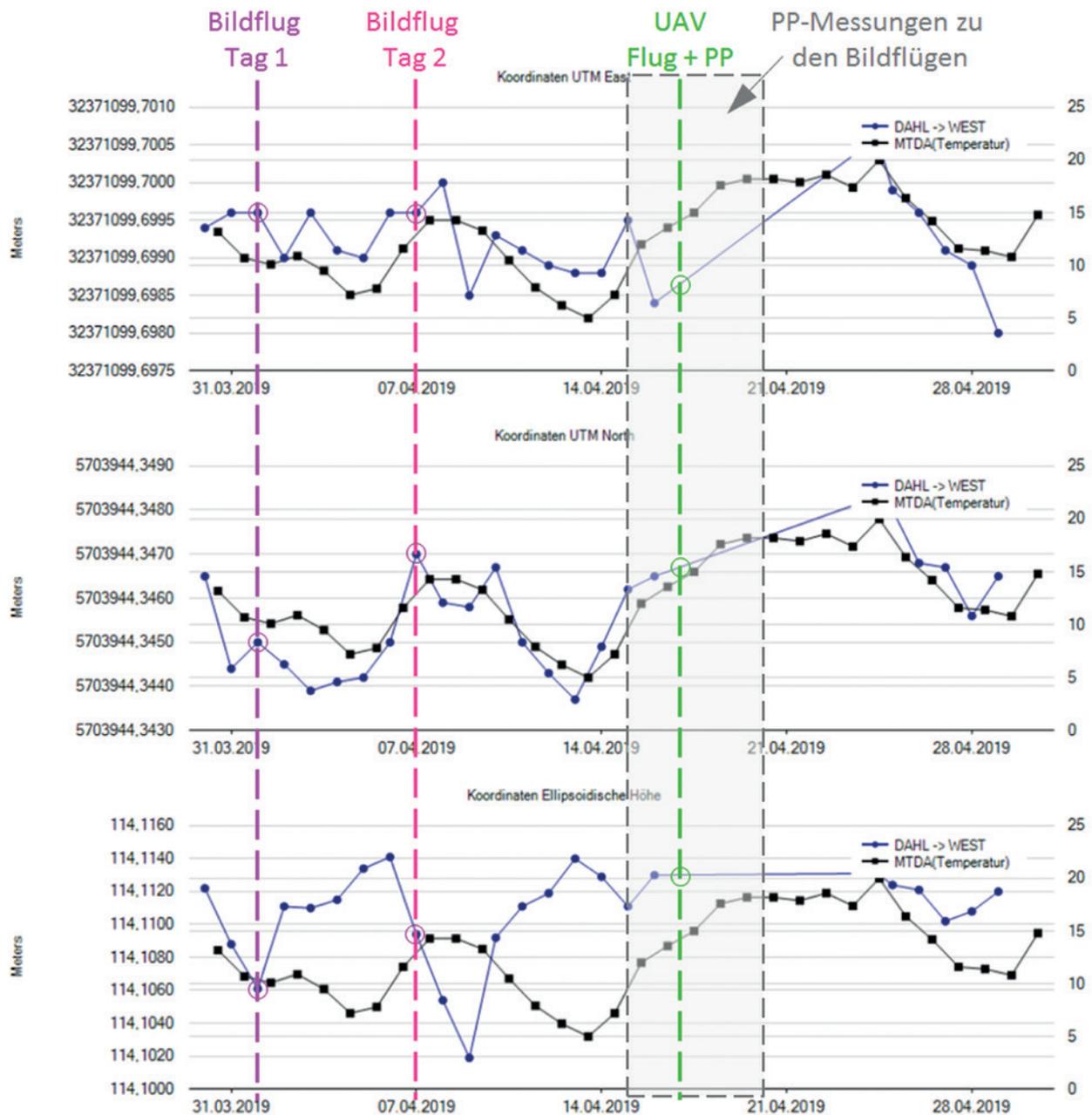


Abb. 5 | Zeitliche Gegenüberstellung verschiedener Messverfahren (zwei Bildflugtage, eine UAV-Befliegung sowie Passpunktmessungen) in Bezug zu einer beispielhaften GNSS-Station mit Darstellung der UTM-Koordinaten, ellipsoidischen Höhen sowie der Temperaturen /Spreckels et al. 2020/

somit bei der gemeinsamen Nutzung zwischen diesen Datenebenen zu Koordinatendifferenzen, welche unter Umständen die für die Überwachungsaufgaben nötige Genauigkeit für Zeitreihenvergleiche und dann auch eine eindeutige Zuordnung von Einflussfaktoren stark beeinträchtigen können.

Wegen der oben aufgeführten Gründe wurde ein geeigneter Ansatz entwickelt, der die Bewegung der Referenzstation extrapoliert und somit eine tagesaktuelle Koordinate für Monitoringaufgaben bereitstellen kann. Als Referenzstationen werden stabile Punkte sowie Punkte mit einem bestimmbareren Bewegungsverhalten verwendet; Punkte, deren Bewegung willkürlich ist, werden ignoriert.

Die GNSS-Beobachtungsdaten der Stationen werden einmal täglich mit der Software WaSoft (L. Wanninger) mittels des Moduls

WaPNet prozessiert. Als Ergebnisse des Post-Processings liegen die dreidimensionalen Koordinaten der Referenzstationen sowie die dazugehörige vollständige Kovarianzmatrix für jeden Tag vor. Sieben Tageslösungen werden zu einer Wochenlösung mit PANDA, unter Berücksichtigung der Kovarianzmatrizen, zusammengefasst. Wenn eine neue Wochenlösung vorliegt, werden alle Wochenlösungen in einer dynamischen Netzausgleichung ausgewertet, wie in Abschnitt 2 beschrieben. Für alle Punkte wird ein verbessertes Bewegungsmodell bestimmt und in der GLOMON-Datenbank gespeichert. Das Bewegungsmodell erlaubt, für jeden beliebigen Zeitpunkt die präzisen Koordinaten eines Punkts zu berechnen. Auch ist es mithilfe des Bewegungsmodells möglich, eine Punkt-Koordinate in die nahe Zukunft (bis zu einer Woche) zu präzisieren.

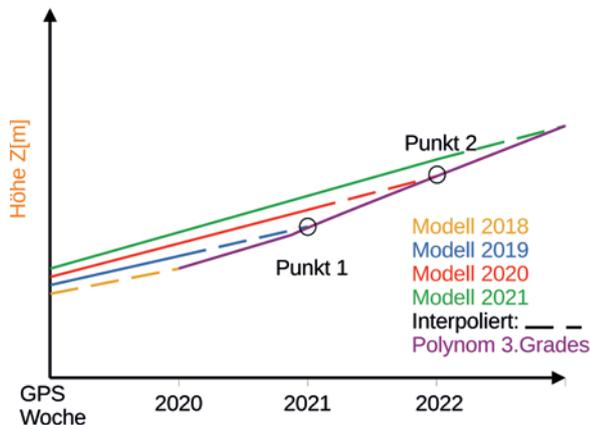


Abb. 6 | Extrapolation des Bewegungsverhaltens der Koordinate eines Punkts für jeweils eine Woche unter Verwendung sämtlicher Ergebnisse bis zur Vorwoche

Durch die Hinzunahme weiterer Wochenauswertungen werden die Bewegungsmodelle sukzessive verbessert, d. h. die Modelle ändern sich von Woche zu Woche.

Für einen gewünschten Zeitpunkt in der Vergangenheit soll immer, unabhängig vom Zeitpunkt der Berechnung, der gleiche Wert für die Koordinaten berechnet werden. Es muss somit das jeweils aktuelle Modell für den gewünschten Zeitpunkt verwendet werden. Dies führt jedoch dazu, dass an den Wochenübergängen Koordinatensprünge auftreten können, da die Bewegungsmodelle Änderungen unterliegen (siehe oben). Um dies zu vermeiden, wird das aktuelle Bewegungsmodell mit dem vorherigen Modell durch ein Polynom 3. Grades verbunden. Die verwendeten Gleichungen (1) bis (5), beispielhaft für die Höhe, sind:

$$h = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \{x \in \mathbb{R} \mid 0 \leq x \leq 1\}, \quad (1)$$

$$h_A = a_0, \quad (2)$$

$$h'_A = v_A = a_1, \quad (3)$$

$$h_E = a_0 + a_1 + a_2 + a_3, \quad (4)$$

$$h'_E = v_E = 1a_1 + 2a_2 + 3a_3, \quad (5)$$

mit

- h_A = Höhe Anfang der Woche,
- v_A = Geschwindigkeit am Anfang der Woche, $x = 0.0$,
- h_E = Höhe Ende der Woche,
- v_E = Geschwindigkeit am Ende der Woche, $x = 1.0$.

Die Höhen und Geschwindigkeiten am Anfang und Ende der Woche werden aus den Modellen berechnet. Mit diesen Werten können die Koeffizienten a_0 bis a_3 aus Gl. (1) bestimmt werden.

Das numerische Vorgehen für eine solche Extrapolation der Koordinaten für die folgende Woche wird beispielhaft in Abb. 6 skizziert. Um die Abbildung zu vereinfachen, wird jeweils ein lineares Bewegungsmodell angenommen, dies ist für den Algorithmus jedoch keine Voraussetzung. Zum aktuellen Zeitpunkt am Ende der *GPS-Woche 2020* wird das Modell 2020 berechnet, dargestellt durch eine durchgezogene rote Linie. Die Extrapolation bis zum Ende der Folgeweche (Ende der *GPS-Woche 2021*) wird durch eine gestrichelte rote Linie beschrieben. Für die vorherige *Woche 2019* wird das Modell durch eine blaue Linie dargestellt. Die Extrapolation, als gestrichelte blaue Linie dargestellt, endet am Ende der *GPS-Woche 2020*. Die Endpunkte der Extrapolation für *Woche 2019* und *Woche 2020* werden durch das Polynom 3. Grades verbunden. Die Koordinate und die Steigung am Anfang der Woche werden dabei aus dem vorherigen Polynom berechnet und Koordinate und Steigung am Ende der Woche werden aus dem aktuellen Modell abgeleitet. Somit stimmen die Polynome in Anfangs- und Endpunkt sowohl im Koordinatenwert als auch in der Steigung (Geschwindigkeit) überein. Für die Bestimmung des Polynoms werden berechnete Modellkoordinaten verwendet, keine beobachteten Positionen. Damit sind auch komplexere Punktbewegungen, wie in Abb. 3 beschrieben, möglich. Die Genauigkeit der extrapolierten Koordinate ergibt sich aus der Güte der Zeitreihenanalyse. Da nur über einen kurzen Zeitraum von einer Woche extrapoliert wird, gibt es keine weitere Anpassung der Standardabweichung.

Damit ist ein wichtiges Ziel des FuE-Vorhabens erreicht: die Entwicklung von Ansätzen zur Bereitstellung von tagesaktuellen Koordinaten für Anschlusspunkte in den Gebieten mit vermuteten Bodenbewegungen. Für verschiedene Anwendungen innerhalb des

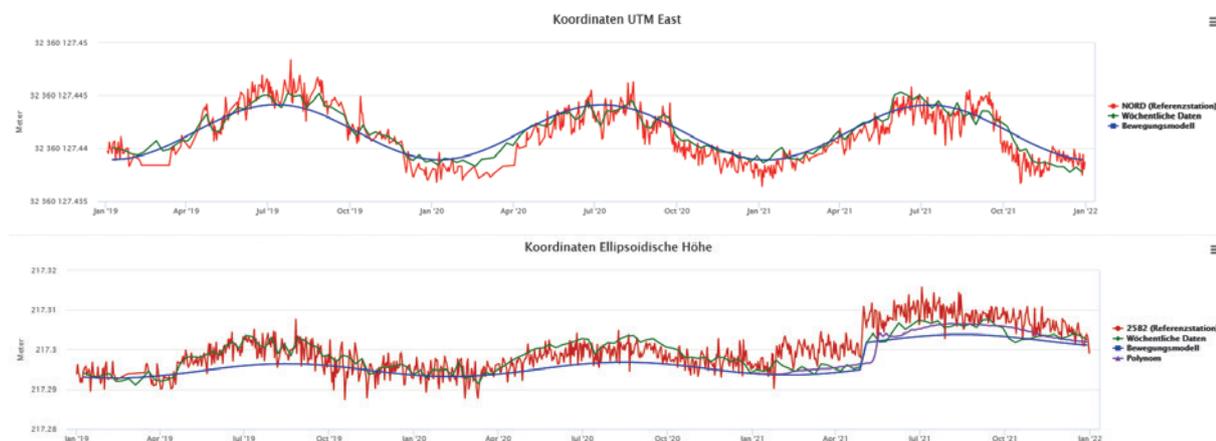


Abb. 7 | Oben: Zeitreihe der UTM Ost-Koordinate der Station NORD (rot) und unten: Zeitreihe der ell. Höhe der SAPOS-Station 2582 (rot), jeweils mit wöchentlichen Daten aus der dynamischen Netzausgleichung (grün) und Bewegungsmodell (blau)

Monitoringnetzes, wie z. B. Passpunktmessungen, werden zukünftige Referenzstationskoordinaten benötigt, welche dem zuvor berechneten Bewegungsverhalten entsprechen. Dies ist mit der Extrapolation der Koordinaten unter Beachtung des Bewegungsmodells möglich.

Die Auswertung auf Basis der GNSS-Daten des in Abb. 4 gezeigten Netzes für die Jahre 2019 bis 2021 wurde mit dem in Abb. 6 skizzierten Modell erprobt und verbessert.

In GLOMON werden die Bewegungsmodelle für die Referenzstationskoordinaten angebracht, sodass sie in den bestehenden 3D-Koordinatenzeitreihen der Referenzstationen visualisiert werden können (s. Abb. 7). Dargestellt werden die Wochenlösungen aus der dynamischen Netzausgleichung, das Bewegungsmodell in Abhän-

gigkeit vom eingestellten Datenzeitraum sowie die Polynome, die unabhängig vom Zeitraum sind. In Abb. 7 (oben) ist eine deutliche Bewegung mit jährlicher Periode in Ost-Richtung zu erkennen. In Abb. 7 (unten) ist das Bewegungsverhalten der Höhe der SAPOS-Station 2582 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der Zeitpunkt eines Antennenwechsels, welcher trotz angebrachter Antennenkorrekturen zu einem Offset von ca. 8 mm in der Höhe führt. Die Bewegungen werden durch die jeweiligen Modelle beschrieben.

Die tagesaktuelle Referenzstationskoordinate wird außerdem für die Berechnung lokaler Basislinien zu Monitoringstationen oder andere Post-Processing-Anwendungen innerhalb GLOMON verwendet. Des Weiteren haben GLOMON-Anwender die Möglichkeit,

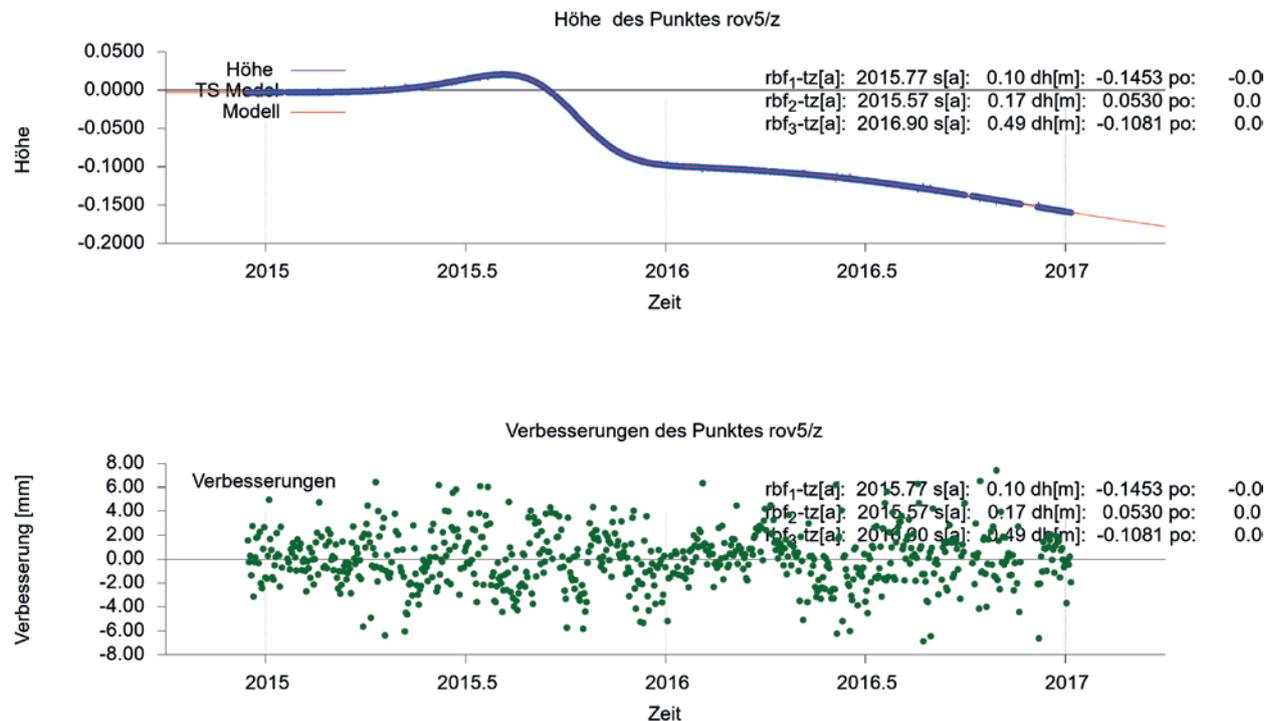


Abb. 8 | Approximation des nichtlinearen Bewegungsverhaltens für die Station ROV5 durch drei RBF

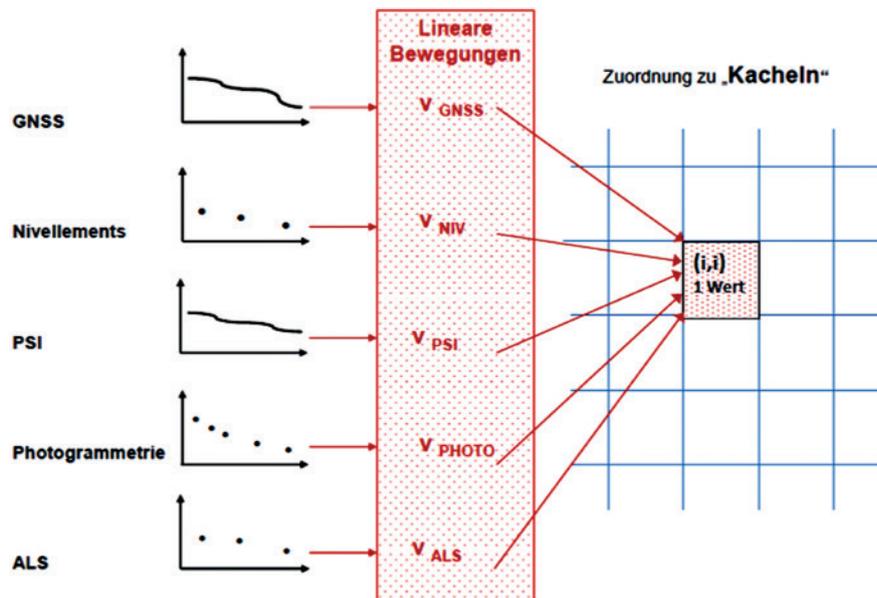


Abb. 9 | Konzept für die Integration verschiedener Sensorik bei nicht-linearem Bewegungsverhalten

RINEX-Daten der GNSS-Stationen herunterzuladen. Die präzise Koordinate im Header kann dann durch die Koordinate aus dem Bewegungsmodell ersetzt werden, wenn für die entsprechende Station ein Bewegungsmodell vorliegt.

5 AUSBLICK

Die aktuell im Rahmen der dynamische Netzausgleichung erzeugten Bewegungsmodelle beschreiben einen linearen Trend, eine saisonale Komponente sowie bei Bedarf Offsets. Die typischen Bewegungen für bergbaubezogene Veränderungen lassen sich jedoch nicht ausschließlich mit diesen Bewegungen beschreiben. Zur Approximation eines solchen nichtlinearen Bewegungsverhaltens bieten sich Radiale Basisfunktionen (RBF) an. Durch Überlagerung mehrerer RBF können auch komplexere nichtlineare Bewegungen approximiert werden. Die Ansätze der Nutzung mehrerer RBF wurden bereits im Bereich des ehemaligen Bergwerks Prosper-Haniel erfolgreich erprobt (s. Abb. 8). Eine Einbindung in die aktive dynamische Netzausgleichung steht noch aus.

Ein weiterer wichtiger Teilaspekt, der im Rahmen des FuE-Vorhabens bisher nur ansatzweise gelöst werden konnte, ist das Zusammenführen der Ergebnisse von unterschiedlichen Sensoren und Messverfahren für das Monitoring von Bodenbewegungen. Eine solche Integration muss zeitlich und räumlich erfolgen, da alle Sensoren und die im Monitoring verwendeten Messverfahren ihre charakteristischen Stärken und Schwächen haben.

Es wurden bereits zwei Konzepte für die Kombination unterschiedlicher Sensoren ausgearbeitet. Eine Kombination kann danach mittels eines funktionalen Ansatzes, also einer Flächenfunktion, oder durch ein geostatistisches Verfahren (s. Abb. 9) erfolgen, basierend auf der Zuordnung von Informationen zu Kacheln. In einem ersten Schritt soll die Integration von InSAR-Daten vorangetrieben werden, um flächenbezogene Informationen über Veränderungen einzubinden.

LITERATUR

Niemeier, W.; Riedel, A.; Tengen, D.; Riedel, B.; Gerke, M. (2020): Bestimmung flächenhafter vertikaler Landbewegungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste. In: Die Küste 91 (Online First), 2022. DOI: <https://doi.org/10.18171/1.091102>.

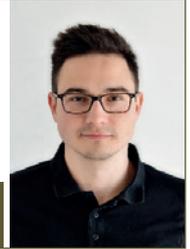
Spreckels, V.; Bechert, S.; Schlienkamp, A.; Drobniowski, M.; Schulz, M.; Schäfer, F.; Kemkes, E.; Ruffer, J.; Niemeier, W.; Tengen, D.; Engel, T.; Müller, M.; Schmitt, P. (2020): GNSS, Nivellement und Radar – einheitliche Multisensor-Referenzpunkte zur Überwachung von Bodenbewegungen in ehemaligen Bergbaubereichen. In: Tagungsband GeoMonitoring 2020, Technische Universität Braunschweig, 207–231. DOI: <https://doi.org/10.15488/9351>.

Tengen, D.; Riedel, A.; Riedel, B.; Gerke, M.; Niemeier, W. (2019): Ableitung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste aus GNSS- und PS-Auswertungen. In: Tagungsband GeoMonitoring 2019, Leibniz Universität Hannover, 121–133. DOI: <https://doi.org/10.15488/4517>.

M. Sc. Florian Schäfer

ALLSAT GMBH

Sokelantstr. 5 | 30165 Hannover
florian.schaefer@allsat.de



Prof. Dr. Wolfgang Niemeier

GEOTEC –
GEODÄTISCHE TECHNOLOGIEN GMBH

Heinrich-Heine-Weg 69 | 30880 Laatzen
wolfgang.niemeier@geotec-gmbh.de



Dipl.-Ing. Jürgen Ruffer

ALLSAT GMBH

Sokelantstr. 5 | 30165 Hannover
juergen.rueffer@allsat.de



Dipl.-Ing. Michael Schulz (MBA)

ALLSAT GMBH

Sokelantstr. 5 | 30165 Hannover
michael.schulz@allsat.de



Dipl.-Ing. Volker Spreckels

RAG AKTIENGESELLSCHAFT

Im Welterbe 10 | 45141 Essen
volker.spreckels@rag.de



Dr.-Ing. Dieter Tengen

GEOTEC –
GEODÄTISCHE TECHNOLOGIEN GMBH

Heinrich-Heine-Weg 69 | 30880 Laatzen
wolfgang.niemeier@geotec-gmbh.de



Manuskript eingereicht: 18.05.2022 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet