Die GNSS-basierten Lagedeformationsnetze in Nordrhein-Westfalen

The GNSS-based Deformation Control Networks in North Rine-Westphalia

Bernd Sager

Dieser Beitrag beschreibt das Konzept einer standardisierten Verfahrensweise für die Messung, Auswertung und Analyse von GNSS-basierten Lagedeformationsnetzen in Nordrhein-Westfalen. Ziel ist es, mittels dreidimensionaler Koordinatenänderungen aus zeitverschiedenen Messepochen belastbare Aussagen über räumliche Lageänderungen von Vermessungspunkten in Bodenbewegungsgebieten treffen zu können. Mit den Deformationsverfahren im Rheinischen Braunkohlerevier und Ruhrgebiet ist dieses Konzept erstmalig realisiert worden. Zur Anwendung kommt mit DefoAWa ein neu entwickeltes Prozesstool, das im Batch-Ablauf auf Programmsysteme der WaSoft[1] und MARKUS zurückgreift. Kern der Auswertungen ist die freie 3D-Netzausgleichung mit Raumvektoren und die Berechnung von 3D-Koordinaten der beiden Null-Epochen.

Schlüsselwörter: Bodenbewegungsgebiete, GNSS-basierte Lagedeformationsnetze, dreidimensionale Koordinatenänderungen, räumliche Lageänderungen, Null-Epoche

This paper describes the concept of a standardized method for the measurement, evaluation, and analysis of GNSS-based deformation control networks in North Rhine-Westphalia. The aim of the method is to make a reliable statement about the change in position of surveying points in areas of ground movement by time-shifted 3D-coordinates. The deformation method was established firstly in the Rhenish lignite mining region and in the Ruhr area. The new process-tool DefoAWa is applied, that uses batch-input from both program systems WaSoft and MARKUS. Core of the evaluation is the free 3D-network adjustment with the space vector and the calculation of 3D-coordinates of both zero epochs.

Keywords: Ground movement areas, GNSS-based deformation control network, three-dimensional coordinate changes, change of position, zero epoch

1 GESETZLICHER AUFTRAG

In Nordrhein-Westfalen ist die Landesverwaltung gesetzlich verpflichtet, Veränderungen der Erdoberfläche regelmäßig zu dokumentieren und in einem Historiennachweis dauerhaft zu führen (§1 Abs. 3 VermKatG NRW vom 01. 03. 2005/§4 Abs. 3 DVOzVermKatG vom 25. 10. 2006).

Die Deformationsanalyse gehörte seit 1990 per Gesetz (VermKatG NW vom 30. 05. 1990) zu den Kernaufgaben der Landesvermessung. Im Abschnitt II: Landesvermessung §5 Aufgaben (1) 1. heißt es:

[1] http://www.wasoft.de

„Die Landesvermessung umfasst die Herstellung, Erneuerung und Erhaltung des Lage,- Höhen- und Schwerefestpunktfelds (Grundlagenvermessung) einschließlich Deformationsanalysen."

In der Durchführungsverordnung (DVzVermKatG NRW vom 31. 12. 1993) wurde die Deformationsanalyse näher spezifiziert:

„Aus zeitverschiedenen Vermessungsergebnissen für Lage-, Höhe- und Schwerefestpunkte, gegebenenfalls unter Einbeziehung besonders angelegter Kontrollnetze oder nachgeordneter Vermessungspunkte, können durch Deformationsanalyse vertikale und horizontale Bewegungen der Erdoberfläche untersucht sowie die Größe der Veränderungsbeträge ermittelt werden … ."

2 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Aufgrund der Tatsache, dass ein Viertel der Landesoberfläche in Nordrhein-Westfalen bergbaubedingten Bodenbewegungen unterliegt, haben Deformationsmessungen hier eine längere Tradition. Insbesondere zur Überwachung von Höhenveränderungen werden von der Bezirksregierung Köln, GEObasis NRW (vormals Landesvermessungsamt NRW) seit mehreren Jahrzehnten in festen Zeitabständen Wiederholungs- und Leitnivellements durchgeführt /Riecken et al. 2011/. GEObasis NRW legt nach Auswertung und Analyse die neuen Höhen der Höhenfestpunkte (HFP) fest und leitet darüber die eingetretenen Bodenbewegungen ab /Haupt 1999/.

Um zusätzliche Erkenntnisse über tektonische und bergbaulich bedingte Lageveränderungen der Erdoberfläche zu gewinnen, die als großflächig regionale Hebungen, Senkungen, Neigungen oder Zerrungen der Oberfläche interpretiert werden können, hat GEObasis NRW in den vergangenen 20 Jahren in tektonisch-bergbaulichen Schwächezonen mehrere geodätisch-geologische Deformationsnetze angelegt. Zu nennen sind die großräumigen Netze im Rheinischen Braunkohlerevier wie Heiko (Höhenänderungen in der Eifel und Koelner Bucht) /Görres & Campbell 1998/ und RheinBraun/Aachen-Erkelenzer-Revier sowie Donatussprung und Rheydt-Odenkirchen als lokale Netze. Im Ruhrgebiet sind es das Leitref-Netz und eine Auswahl von Referenzpunkten im Bodenbewegungsgebiet des Steinkohlereviers zwischen Rhein, Ruhr und südlichem Münsterland. Die Netze entstanden z. T. in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der Universität Bonn und der Markscheideabteilung von RWE Power (vgl. /Spata et al. 1993/, /Sager 1995/, /Klostermann et al. 1998/, /Görres et al. 2006/, /Sager et al. 2008/).

Das zukünftige Konzept der Lagedeformationsanalyse sieht für Nordrhein-Westfalen eine standardisierte Vorgehensweise auf der Grundlage von epochenverschiedenen GNSS-basierten 3D-Netzausgleichungen vor, die mittels Änderungsraten der Koordinaten den Stabilitätsgrad der Vermessungspunkte im Sinne von Geosensoren repräsentieren sollen und damit den Gedanken des „Festpunkts als Geosensor" in Anlehnung an die Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland /AdV 2014/ aufgreifen. Für die Realisierung des Konzepts ist sowohl eine einheitliche Struktur der Messabläufe als auch ein neues Auswerteprogramm für die einheitliche Auswertung der Lagedeformationsnetze entwickelt worden. Um signifikante Aussagen über die Lagestabilität von Vermessungspunkten in den beiden Bergbauregionen treffen zu können, werden in periodischen Abständen von vier bzw. zwei Jahren Wiederholungsmessungen im Rheinischen Braunkohlerevier und im Ruhrgebiet stattfinden. Dabei wird die Mehrzahl der Punkte aus den bisherigen Einzelnetzen in die neuen Netzstrukturen der beiden Regionen integriert.

Ein weiteres Ziel des neuen Konzepts ist es, den Nachweis von Koordinaten- bzw. Vektoränderungen in Lagedeformationsnetzen zu führen. Erst die lückenlose Zeitfolge der Messergebnisse ermöglicht eine gesicherte Beurteilung der Lageänderungen von Vermessungspunkten in Bodenbewegungsgebieten.

Im folgenden Kapitel wird über die Realisierung des neuen Konzepts und die ersten Ergebnissen aus den beiden Verfahren RheinBraun[2] und Ruhrgebiet berichtet.

3 DIE LAGEDEFORMATIONSNETZE

Zur Differenzierung der zu untersuchenden Lagestabilität befinden sich die Punkte der Lagedeformationsnetze sowohl innerhalb als auch außerhalb der Bodenbewegungsgebiete (*Abb. 1*). Diese sind hauptsächlich aus den Erkenntnissen der Höhenuntersuchungen der beiden Leitnivellements in Nordrhein-Westfalen abgeleitet worden. Die blau dargestellten Flächen werden definiert durch Verdachtsgebiete, in denen Höhenbewegungen größer als ±3 mm pro Jahr erwartet werden. Alle Festpunkte im amtlichen Nachweis der

Abb. 1 | Bodenbewegungsgebiete in NRW mit Lagedeformationsnetzen /Sager 2014/

[2] Im weiteren Text wird das Verfahren im Rheinischen Braunkohlerevier mit der Abkürzung „RheinBraun" bezeichnet.

Nordrheinwestfälischen Landesvermessung (AFIS NRW), die innerhalb dieser Flächen liegen, werden durch die Bemerkung „aktuelles Bodenbewegungsgebiet“ periodisch fortgeführt /Heitmann et al. 2012/.

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse aus den bergbaubetroffenen Lagedeformationsnetzen haben einen eher heterogenen Charakter, da bisher jedes Netz separat analysiert worden ist. Um eine großräumige Einheitlichkeit in den beiden Bergbauregionen zu erhalten, wurden die jeweiligen Einzelnetze konzeptionell zusammengefasst.

3.1 Das RheinBraun-Netz

Die einzelnen Punkte des neu konzipierten Lagedeformationsnetzes im Rheinischen Braunkohlerevier unterscheiden sich in ihrem Entstehungszeitraum, ihrem Zweck und ihrer Netzgeometrie. Von insgesamt 49 Punkten stammen 20 Punkte aus dem NWREF-Netz /Geef et al. 1999/ und sind unterirdisch durch Granitplatten mit Messingbolzen vermarkt. Diese Punktauswahl umfasst die gesamte Einflusszone des Braunkohlereviers (RB). Aus dem Deformationsnetz Donatussprung (DO) wurden von ursprünglich 13 Punkten insgesamt acht Punkte in das Gesamtnetz übernommen. Dieses Netz deckt einen regional begrenzten Bereich der geologischen Störzone des Erftsprungsystems mit dem Namen Donatussprung im Raum Erftstadt/Liblar ab /Sager 1995/, /Görres et al. 2006/. Die Vermarkungen der Punkte bestehen aus oberirdischen Messmarken oder unterirdischen Platten. Von den ursprünglich 17 Punkten des Deformationsnetzes Rheydt-Odenkirchen (RO) wurden 15 Punkte in das Gesamtnetz RheinBraun integriert. Das Netz wurde ursprünglich angelegt, um die Auswirkungen von bergbaubedingten Grundwasserabsenkungen am Rheindahlener Sprung in Rheydt-Odenkirchen zu untersuchen. Die Vermarkungen dieser Punkte sind ausnahmslos tiefgründig eingebrachte Betonpfeiler mit Messingbolzen /Sager et al. 2008/. Eine großräumige Ergänzung ist das Deformationsnetz Heiko (HE) mit insgesamt zehn Punkten, von denen drei Punkte auch Bestandteil des Donatussprung-Netzes sind, des Weiteren zwei Permanentstationen des BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) in Jackerath und ZGeoBw (Bundeswehr) in Euskirchen. Ein weiterer Punkt gehört zur ehemaligen Satellitenstation der Universität Bonn in Todenfeld südlich von Rheinbach. Dieses ursprünglich vom Geodätischen Institut der Universität Bonn initiierte und abgeschlossene Forschungsvorhaben befasste sich zwischen 1993 und 2009 mit der Untersuchung von hochgenauen Höhenänderungen aus GPS/GNSS-Messungen. Alle Punkte dieser bisherigen Deformationsnetze wurden schon in den Jahren zuvor mehrfach bestimmt, jedoch mit unterschiedlichen Mess- und Analysekonzepten. Die bisherigen GPS/GNSS-Messungen der Netze HE, RB, DO und RO erfolgten jeweils zeitnah zu den Zyklen der Leitnivellements. Das neue Gesamtnetz hat eine Ausdehnung von 100 km in Ost-West-Richtung und 90 km in Nord-Süd-Richtung. Der überwiegende Teil des Gebiets ist von flacher Topographie und zumeist dörflich geprägt. Größere Orte sind Mönchengladbach, Erkelenz, Düren und Euskirchen. Die südlichsten und östlichsten Punkte befinden sich in der Hocheifel bzw. im Bergischen Land, die nördlichsten Punkte am Niederrhein sowie im Nettetal/Schwalmtal. Die Punktabstände liegen zwischen ca. 0,4 km und 100 km (*Abb. 2*).

3.2 Das Ruhrgebiet-Netz

Der Umfang des neuen Netzes wurde aus dem Altbestand mit insgesamt 30 Punkten festgelegt. Dazu gehören 17 NWREF-Punkte, zehn Leitref-Punkte und drei Bodenpunkte von SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst) Stationen. Alle Punkte sind in der Vergangenheit wiederholt koordiniert worden, jedoch wie im Netz des Rheinischen Braunkohlereviers nach unterschiedlichen Konzepten. Ebenso verfolgten diese Wiederholungsmessungen unterschiedliche Zielrichtungen. Zum einen dienten sie der Kontrollkoordinierung aufgrund möglicher Bodenbewegungseinflüsse im Ruhrgebiet

GNSS garantiert zukunfts-sicher

GNSS ∞ UNLIMITED

Modulare Aufrüstbarkeit sichert Ihre Investition bis über das Jahr 2020 hinaus ab.

- RTK Software-Update für BeiDou
- Vorrüstbar für Galileo und BeiDou
- Erweiterbar auf mehr als 500 Kanäle

Leica Geosystems
Tel. 089/14 98 10 0

Leica Geosystems

und zum anderen der Genauigkeitsuntersuchung von Höhenunterschieden zwischen GNSS- und den zeitnah stattfindenden nivellitischen Höhenbestimmungen der Leitnivellements. Alle Punkte sind durch unterirdische Platten oder Betonblöcke mit Messingbolzen vermarkt. Das Gebiet des Lagedeformationsnetzes im Ruhrgebiet hat eine Ost-West-Ausdehnung von ca. 106 km und eine Nord-Süd-Ausdehnung von ca. 41 km. Die kürzeste Verbindung zwischen den Punkten beträgt ca. 0,7 km und die längste ca. 38 km. Geographisch ist das Netz zwischen den Städten Geldern im Westen und Hamm im Osten sowie Gr. Reken im Norden und Duisburg im Süden verortet (*Abb. 3*).

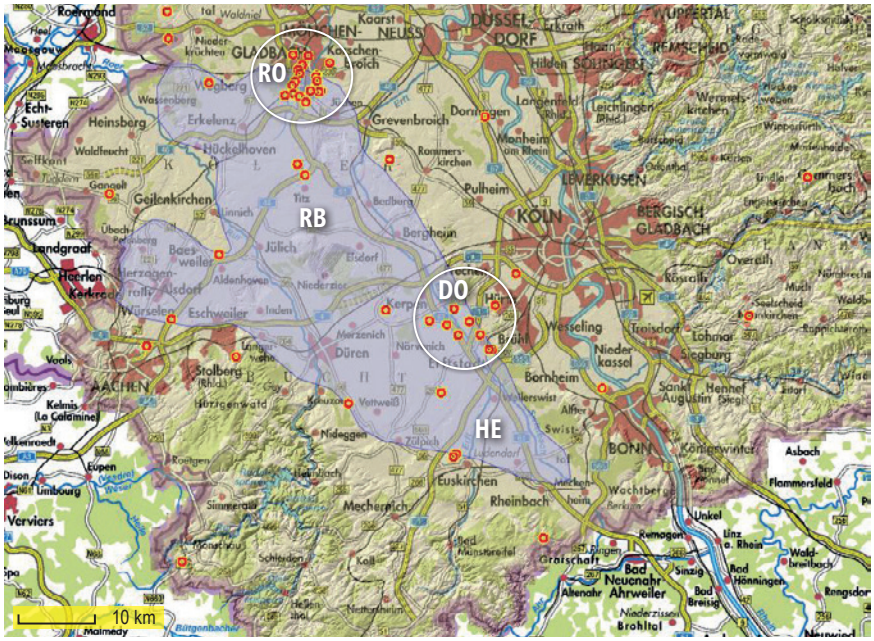

Abb. 2 | Lagedeformation RheinBraun 2013, Punktübersicht mit Bodenbewegungsfläche /Sager 2013/

4 GNSS-PLANUNG UND -MESSUNG

Die Durchführung der Planung und GNSS-Messung erfolgte in beiden Lagedeformationsnetzen nach dem gleichen Konzept, wobei die Erfahrungen aus dem RheinBraun-Netz 2013 für das Ruhrgebiet-Netz 2014 angewendet werden konnten. Somit waren die gleichen Voraussetzungen für eine standardisierte Lagedeformationsanalyse gegeben.

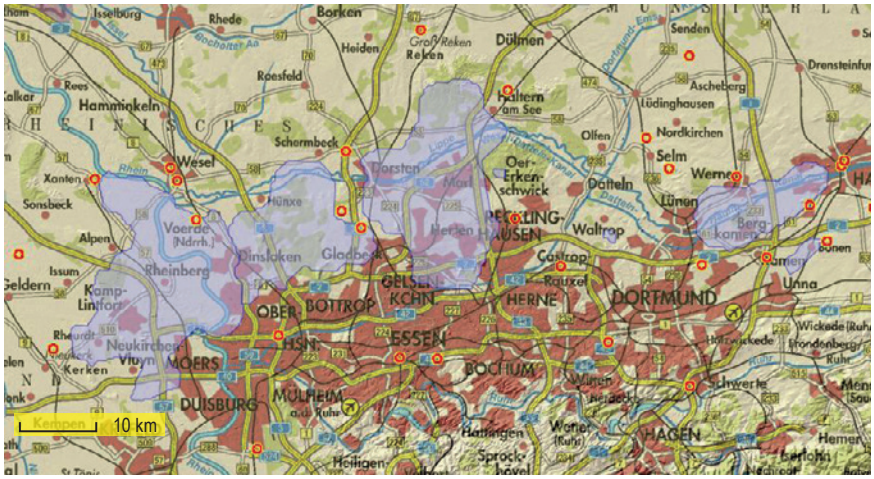

Abb. 3 | Lagedeformation Ruhrgebiet 2014, Punktübersicht mit Bodenbewegungsflächen /Sager 2014/

4.1 Planung und Vorbereitung

Das Prinzip der Netzplanungen sah eine sessionsgebundene und nachbarschaftsbezogene Messanordnung mit vier Messtrupps vor, aus der für jede Session insgesamt sechs Basislinien[3] abgeleitet werden konnten. Nach der Planung aller Sessionen waren pro Messpunkt sechs bis max. zwölf Basislinien nachbarschaftsbezogener Basislinien ableitbar, was für die Punktbestimmungen eine gute Kontrollierbarkeit und Zuverlässigkeit bedeutet. Ein weiteres Kriterium für eine gute Kontrollierbarkeit war die mehrfache Besetzung der Messpunkte mit unterschiedlichen Messtrupps und Geräten. Beispielhaft wird der Sessionsplan für das Verfahren Ruhrgebiet 2014 dargestellt, sowie die ableitbaren Basislinien (rote Linien) der Session Nr. 10 (*Abb. 4*). Für die GNSS-Messungen des Verfahrens RheinBraun 2013 wurden bei einem Umfang von 49 Punkten insgesamt 34 Sessionen, für das Verfahren Ruhrgebiet 2014 bei einem Umfang von 30 Punkten insgesamt 18 Sessionen geplant (Beispiel für eine Arbeitswoche *Abb. 5*).

Zusammenfassung der Planung:

- nachbarschaftsbezogene Punktbestimmung;
- Mehrfachbestimmung der Punkte mit unterschiedlichen Messtrupps;
- sessionsgebundene Messanordnung (vier simultan gemessene Punkte).

4.2 GNSS-Messung

Zur Messung und Registrierung der Träger- und Codephasen von GPS- und Glonass-Satellitensignalen wurden einheitlich

[3] Der Raumvektor zwischen zwei Antennenstandpunkten wird als Basislinie bezeichnet. Bestimmt werden kartesische relative Koordinaten ΔX, ΔY, ΔZ zwischen den beteiligten Stationen.

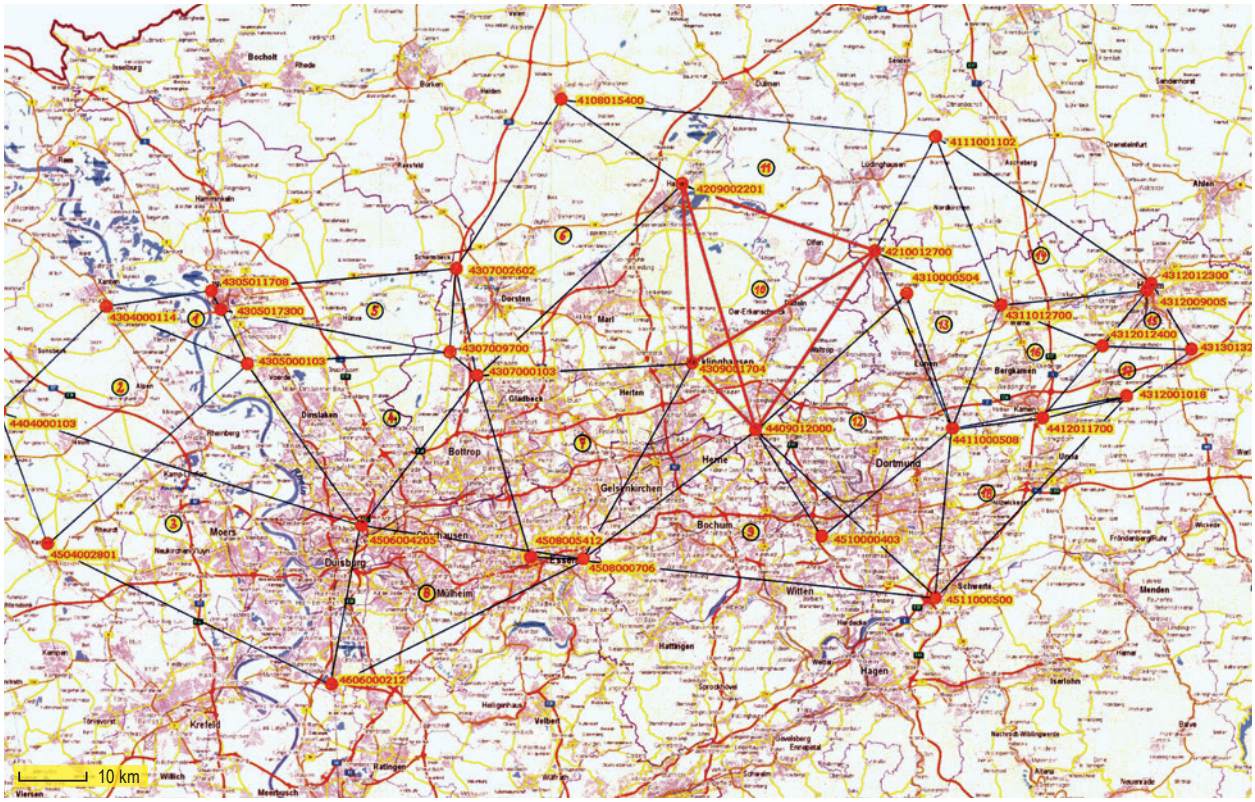

Abb. 4 | Sessionsplan Ruhrgebiet 2014 /Sager 2014/

Session	Datum	Trupp 1	Trupp 2	Trupp 3	Trupp 4
Nr.	Tag Uhrzeit (MESZ)	ÖbVI 1 Station	ÖbVI 2 Station	ÖbVI 3 Station	BR (Köln) Station
1	07.07.2014 (Tag 188) 9:00 – 15:00	Xanten, Fürstenberg 4304000114	Voerde, Binnenfeld 4305000103	Wesel, Lippestadion 4305017300	Wesel, Römerwardt 4305011708
2	08.07.2014 (Tag 189) 9:00 – 15:00	Wetten, Dammschenhof E 4404000103	Eyll, Am Pegelsweg 4504002801	Voerde, Binnenfeld 4305000103	Xanten, Fürstenberg 4304000114
3	09.07.2014 (Tag 190) 9:00 – 15:00	Eyll, Am Pegelsweg 4504002801	Duisburg-Rahm, Kirche 4606000212	DU-Neumühl 4506004205	Wetten, Dammschenhof 4404000103
4	10.07.2014 (Tag 191) 9:00 – 15:00	Voerde, Binnenfeld 4305000103	Hardinghausen 4307009700	Kirchhellen I 4307000103	DU-Neumühl 4506004205
5	11.07.2014 (Tag 192) 9:00 – 15:00	Wesel, Römerwardt 4305011708	Wesel, Lippestadion 4305017300	Hardinghausen 4307009700	Emmelkamp 4307002602

Abb. 5 | Ablaufplan Ruhrgebiet 2014 (Ausschnitt) /Sager 2014/

GNSS-fähige Receiver und GNSS-Antennen verwendet. Für das Netz der Rheinischen Braunkohle 2013 waren dies ein Trimble R5, ein Trimble NetR5 und drei Trimble R7 sowie vier GNSS-Antennen vom Typ Trimble Zephyr Geod.2 und für das Ruhrgebiet 2014 ein Trimble NetR5, zwei Trimble NetR9 und ein Trimble R7 und ebenfalls vier GNSS-Antennen vom Typ Trimble Zephyr Geod.2. Vor den Messkampagnen erfolgte die einheitliche Absolutkalibrierung aller Antennen in der Antennenmesskammer der Bezirksregierung Köln. Des Weiteren wurden alle Receiver mit den gleichen Aufzeichnungsparametern konfiguriert. Zu nennen sind im Wesentlichen das Messintervall mit 15 s und die Elevationsmaske mit 5°. Die simultane GNSS-Messung auf allen vier Punkten einer Session wurde konstant auf sechs Stunden festgelegt. Neben der exakten Zentrierung der antennenbestückten Stative über den unterirdischen Vermarkungen war die präzise Antennenhöhenbestimmung ein weiteres zentrales Kriterium der GNSS-Messung. Hierzu wurde ein Verfahren angewendet, das für eine bundesweite GNSS-Kampagne 2008 entwickelt worden ist. Durch den Einsatz von speziellen Antennenträgern mit integriertem Messstab in Verbindung mit einem kontrolliert durchgeführten örtlichen Nivellement mittels Hilfspunkten ist eine Höhenbestimmungsgenauigkeit der GNSS-Antenne von < 1 mm möglich.

Zusammenfassung der GNSS-Messung:

- simultane GNSS-Messung;
- Verwendung von GNSS-fähigen Receivern mit gleichen Einstellungen;

- Verwendung von GNSS-fähigen Antennen mit Absolutkalibrierung;
- Messbeginn täglich um 9.00 Uhr MESZ;
- Messdauer 6 Stunden;
- Aufzeichnungsintervall => 15 s;
- Elevationsmaske => 5°;
- drei Vergabetrupps (ÖbVI), ein behördeneigener Messtrupp;
- kontrollierte Zentrierung mit optischem Lot;
- kontrollierte und mehrfache Antennenhöhenbestimmung.

4.3 Vorauswertung

Um die jeweilige Messkampagne mit ihren fortlaufenden GNSS- und Höhenmessungen zeitnah zu kontrollieren, wurde eine tägliche Vorauswertung der Messdaten durchgeführt. Hierzu gehörten die programmunterstützten Plausibilitätsprüfungen der GNSS-Messdaten im Nutzerformat Rinex 2.11, die Koordinaten- und Höhenberechnungen im System ETRS89 (Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989) sowie der Vergleich dieser Werte bei Mehrfachmessungen. So war es möglich, bei Fehlergrenzüberschreitungen oder Abweichungen vom Ablaufplan sehr zeitnah notwendige Ergänzungs- bzw. Wiederholungsmessungen zu veranlassen. Die Vorauswertung wurde mit dem Programm ViGO+ (Virtuelle Auswertung mit einer grafischen Oberfläche) durchgeführt /Klotz & Sager 2012/. Die Bedienoberfläche von ViGO+ greift auf das Programmsystem WaSoft (Wanninger Software) zu und bereitet die erzeugten Ergebnisse auch grafisch auf:

- Berechnung virtueller Referenzstationen (VRS) mittels GNSS-Messungen realer SAPOS-Referenzstationen;
- Berechnung von GNSS-Basislinien zwischen VRS und Messpunkt (Rover);
- Ableitung von UTM-Koordinaten und Höhen im Landessystem ETRS89 mit einer Genauigkeit von < ± 20 mm;
- Mittelung mehrfach bestimmter Messpunkte;
- Vergleich mit Soll-Werten (z. B. Nachweis);
- grafische Darstellung (z. B. Änderungsvektoren).

Alle Messpunkte der jeweiligen Messkampagne wurden täglich mit ViGO+ in gleicher Weise prozessiert. Die in den Vorauswertungen geprüften Rinex-Observations-Dateien (z. B. 43132100.14o) und Rinex-Navigations-Dateien (z. B. 43132100.14n) bilden als punktbezogene GNSS-Messelemente die Grundlage für die anschließende Lagedeformationsanalyse.

5 LAGEDEFORMATIONSANALYSE

Für die einheitlich strukturierte Auswertung und Analyse von Lagedeformationsnetzen ist bei der Bezirksregierung Köln ein Programm mit dem Namen DefoAWa (DeformationsAnalyse mit WaSoft) entwickelt worden, das auf der Grundlage einer nachhaltig angelegten Netzstruktur die Reproduzierbarkeit von Epochenergebnissen über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Dazu gehört neben der Berechnung von punktbezogenen Epochenkoordinaten die grafische Darstellung von Lageänderungen. Die Deformationsanalyse besteht im Wesentlichen aus dem Vergleich von Wiederholungsepochen.

Programmablauf in Kurzfassung:
Zunächst werden die Anfangspunkte aller netzrelevanten Basislinien vom System ETRS89 in das System ITRFnnnn[4] (International Terrestrial Reference Frame nnnn) transformiert[5]. Danach erfolgt die Prozessierung aller definierten Basislinien mit dem Programm WaSoft. Im Anschluss wird aus den Basislinienergebnissen eine Raumvektorendatei mit den Vektorkomponenten ΔX, ΔY, ΔZ generiert. Diese Datei wird im nachfolgenden MARKUS-Modul (Modulare Auswertung räumlicher Koordinaten und Koordinatenunterschiede) MARARA (Ausgleichung der dreidimensionalen kartesischen Koordinaten nach vermittelnden Beobachtungen) für eine freie 3D-Netzausgleichung mit Auffelderung auf die Anschlusskoordinaten verwendet. Abschließend erfolgt mit dem MARKUS-Modul MARTRA (Transformation ungleichartiger dreidimensionaler Koordinaten) die Rücktransformation der berechneten Koordinaten ins System ETRS89. Die in MARTRA ermittelten 3D-Koordinaten entsprechen den Werten der Null-Epoche und dienen in allen Wiederholungsepochen als Anschlusskoordinaten /Ahrens 1988/, /Ahrens 2013b/.

5.1 Auswertestrategie

Für den Programmablauf von DefoAWa werden folgende Daten bereitgestellt:

- GNSS-Messdaten (o-files);
- Broadcast-Ephemeriden (n-files, g-files);
- präzise Ephemeriden (sp3-files);
- Datei der Antennenparameter (.atx);
- Punktdaten (PU000.dat);
- Definitionsdatei der Basislinien (rvdef.dat);
- Steuerdatei MARKUS.

Kern der Auswertung ist eine zwangsfreie 3D-Ausgleichung mit Auffelderung auf gegebene Anschlusspunkte im ITRF2008. Mit dieser Auswertestrategie werden einerseits die Qualität der Raumvektoren geprüft und anderseits die Änderungen gegenüber den Koordinaten der Null-Epoche ermittelt. Diese lassen sich als epochenabhängige räumliche Lageänderungen der Deformationspunkte interpretieren. Die grafische Darstellung der Änderungsvektoren unterstützt optional die Interpretation der Deformationsanalyse. Bei der Auswertung der aktuellen Null-Epochen für RheinBraun und Ruhrgebiet gilt das Augenmerk maßgeblich der Qualität des Messmaterials und den Koordinaten für die Folgeepochen. Im Hauptformular des Programms DefoAWa werden zunächst die Eckdaten der Auswertung festgelegt und der Startbutton aktiviert. Danach erfolgt ein vollautomatischer, über Batch-Prozeduren gesteuerter Programmablauf (*Abb. 6*).

[4] Verwendetes System in DefoAWa: ITRF2008
[5] Berechnung der sieben Parameter vom ITRFnnnn ins ETRS89/DREF91 für die aktuelle Auswertung (AdV 2008, AdV 2011, Tabelle 4, Vorzeichen der Drehwinkel umgekehrt!) /DefoAWa 2013/

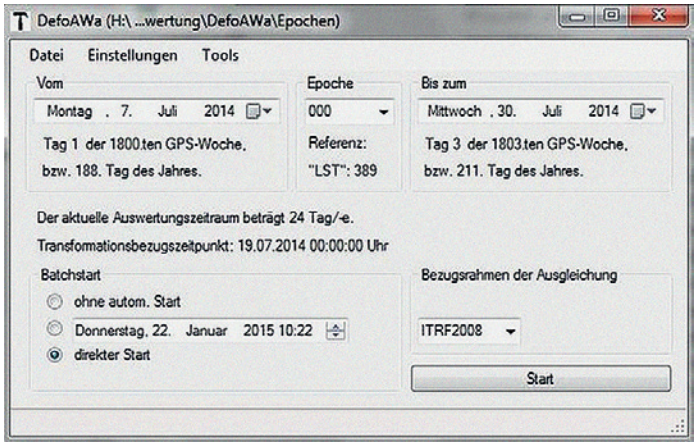

Abb. 6 | Programmformular DefoAWa (Beispiel Ruhrgebiet) /Sager 2014/

5.2 Analyse der Lagedeformationsnetze

5.2.1 RheinBraun

Das Lagedeformationsnetz RheinBraun 2013 hat die Funktion einer Null-Epoche und bildet die Grundlage für alle Folgeepochen, deren Koordinatenänderungsraten zukünftig die Bodenbewegungsverhältnisse im Braunkohlerevier widerspiegeln (*Abb. 7*). Zu den geplanten 49 Bodenpunkten ist das Netz um drei Punkte ergänzt worden, welche die Netzstruktur insgesamt stabilisieren. Dazu gehört im Norden die SAPOS-Station Viersen, die Permanentstation Titz des BKG auf dem Gelände des Geologischen Dienstes NRW und die Permanentstation auf dem Dach der ZGeoBW der Bundeswehr in Euskirchen. Die benötigten GNSS-Messungen der drei Punkte wurden aus den Permanentmessungen selektiert und in die Auswertung integriert. Das 3D-Netz umfasst insgesamt 3 x 52 (156) Koordinatenunbekannte und 3 x 275 (825) Raumvektoren. Im MARKUS-Modul MARARA erfolgte eine freie 3D-Netzausgleichung im System ITRF2008 mit Auffelderung auf alle Anschlusskoordinaten. Als Anschlusskoordinaten wurden hier die transformierten Koordinaten aus der statischen Vorauswertung mit ViGO+ verwendet. Bei diesem Ausgleichungstyp werden durch programminternes Umsetzen der Auswertekennungen die Anschlusskoordinaten zu Auffelderungskoordinaten. Die Auffelderungskoordinaten werden als Neupunktkoordinaten ausgeglichen. Sie dienen jedoch zusätzlich zur Abstützung des Netzes bei der zwangsfreien Ausgleichung oder wenn für eine angeschlossene Ausgleichung zu wenig Anschlusspunkte eingegeben wurden, zum Beispiel für die Bestimmung von Transformationsparametern. In diesen Fällen erkennt das Programm die Rangdefekte und führt mit den Auffelderungspunkten Restriktionsgleichungen ein /Ahrens 2013a/.
Statistische Angaben zur Ausgleichung:

- Verbesserungen der Raumvektorenkomponenten:
  v_X max.: –0,022 m,
  v_Y max.: +0,010 m,
  v_Z max.: +0,017 m.
- Punktfehler (nach Helmert):
  MP max.: ±0,007 m,
  Mittel: ±0,004 m.

Abschließend wurden im MARKUS-Modul MARTRA alle ausgeglichenen 3D-Koordinaten des Systems ITRF2008 mit festen Parametern ins Bezugssystem ETRS89 zurücktransformiert. Diese Werte dienen mit dem Punktstatus 000 in kommenden Wiederholungsepochen als Anschlusskoordinaten.

GNSS
präzise
bei Daten-
ausfall

GNSS
UNLIMITED

SmartLink Korrekturen erlauben die Überbrückung von Unterbrechungen des RTK-Signals.

- bis zu 10 Minuten
- +/- 5 cm rms
- Empfang über Satellitenantenne

Leica Geosystems
Tel. 089/14 98 10 0

Leica Geosystems

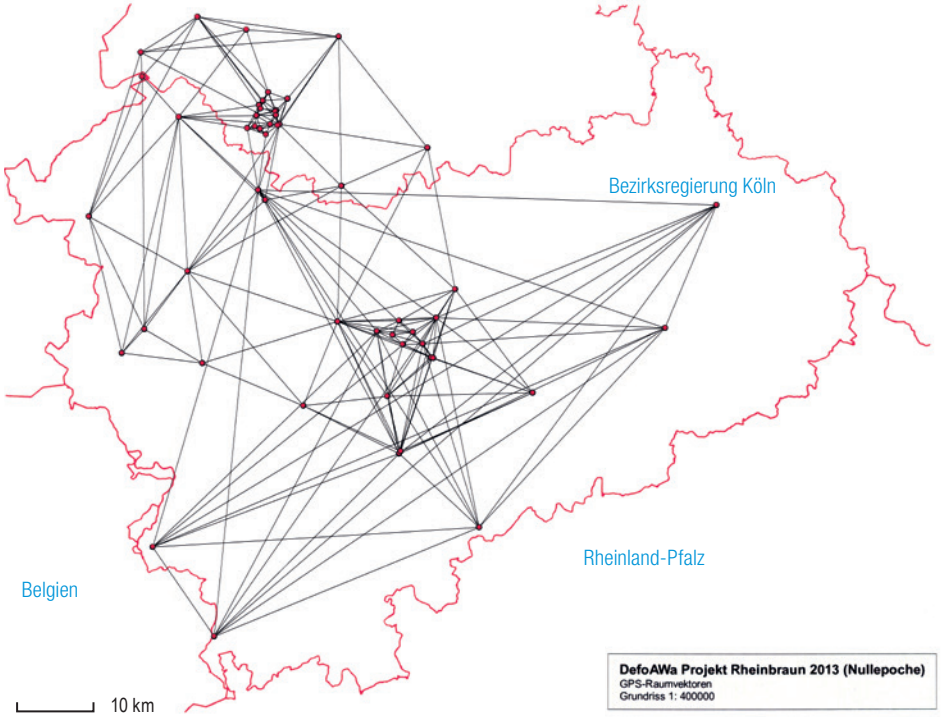

Abb. 7 | Lagedeformationsnetz RheinBraun /Sager 2013/

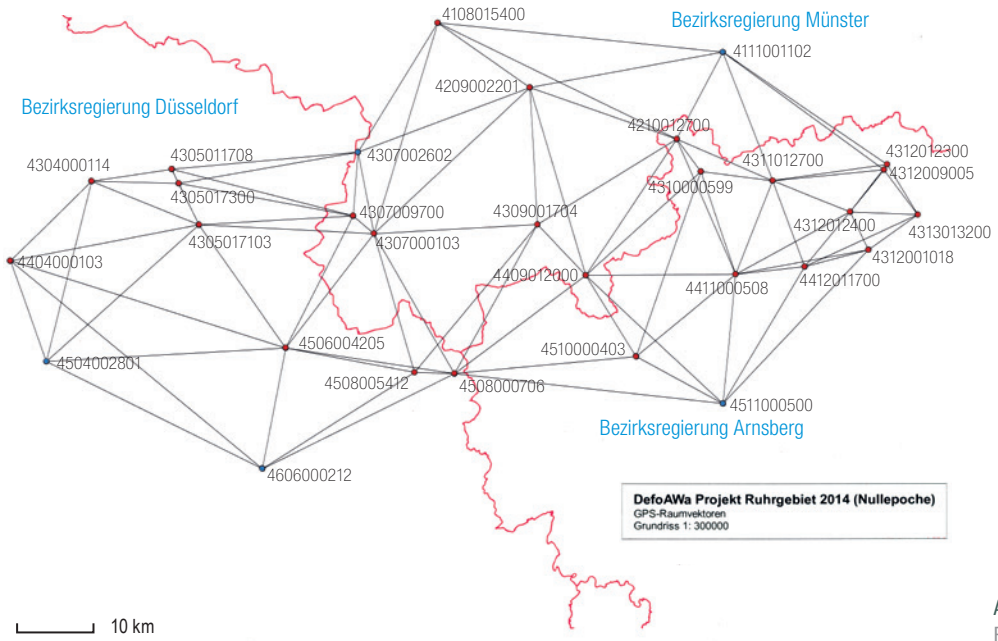

Abb. 8 | Lagedeformationsnetz Ruhrgebiet /Sager 2014/

5.2.2 Ruhrgebiet

Entsprechend dem Lagedeformationsnetz im Braunkohlerevier bildet auch diese Null-Epoche die Grundlage für alle folgenden Wiederholungsepochen. Den 30 geplanten Bodenpunkten sind keine weiteren hinzugefügt worden (*Abb. 8*). Das 3D-Netz umfasst insgesamt 3 x 30 (90) Koordinatenunbekannte und 3 x 108 (324) Raumvektoren. Die Auswertung erfolgte ebenfalls im MARKUS-Modul MARARA als freie 3D-Netzausgleichung mit Auffelderung auf alle Anschlusskoordinaten im System ITRF2008.

Statistische Angaben zur Ausgleichung:

- Verbesserungen der Raumvektorenkomponenten:
  v_X max.: +0,018 m,
  v_Y max.: +0,007 m,
  VZ max.: +0,020 m.
- Punktfehler (nach Helmert):
  MP max.: ±0,005 m,
  Mittel: ±0,004 m.

Abschließend wurden im MARKUS-Modul MARTRA alle ausgeglichenen 3D-Koordinaten im System ITRF2008 mit festen Trans-

formationsparametern ins Bezugssystem ETRS89 überführt. Sie dienen in kommenden Wiederholungsepochen ebenfalls als Anschlusskoordinaten. In einer weiteren Berechnung wurden explizit fünf Anschlusspunkte als Auffelderungspunkte definiert (blaue Punkte in *Abb. 8*). Im Ergebnis differieren die 3D-Koordinaten der Null-Epoche gegenüber der Ausgleichung mit 30 Auffelderungspunkten um max. 2 mm. Diese fünf Punkte sind in der bundesweiten GNSS-Kampagne 2008 bestimmt worden und unterliegen keinen Bergbaueinflüssen oder tektonischen Veränderungen. Welche Variante der Auffelderung in Zukunft angewendet wird, soll in der Analyse der Folgeepoche näher untersucht und festgelegt werden.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Zielsetzung war die Entwicklung eines Konzepts, das für Nordrhein-Westfalen einen standardisierten Modus für den Nachweis bergbau- und tektonisch bedingter Lageänderungen realisieren soll. Dazu zählt das methodische Vorgehen bei der Anlage von Lagedeformationsnetzen, welches neben der Planung der Netzbestimmungsgeometrie auch die GNSS-basierte Neubestimmung der Deformationspunkte beinhaltet. Bei der verfahrenstechnischen Umsetzung für neue Lagedeformationsnetze wurde auf Erfahrungen wie z. B. der Sessionsplanung zurückgegriffen. Ein weiterer Aspekt war das systematische Vorgehen bei der Auswertung und der Netzanalyse. Dafür wurde das Prozesstool „DefoAWa“ entwickelt, das eine Batch-Datei zur Auswertung von Null- und Wiederholungsepochen in Deformationsnetzen erstellt und im Batch-Ablauf auf die Programmsysteme WaSoft sowie Module des Programmsystems MARKUS zurückgreift. Kern der Auswertung ist die freie 3D-Ausgleichung von Raumvektoren im ITRFnnnn und der abgeleiteten Koordinatenänderungen gegenüber der Null-Epoche.

In den Bodenbewegungsgebieten des Rheinischen Braunkohlereviers und des Ruhrgebiets ist erstmals das neue Konzept einer standardisierten Lagedeformationsanalyse angewendet worden. Nach der Interpretation der statistischen Angaben von zwei Null-Epochen kann bei erzielten Punktgenauigkeiten von durchschnittlich $< \pm 5$ mm davon ausgegangen werden, dass zukünftige Lageänderungen erst bei einer Größenordnung von 10 mm – 20 mm signifikant nachgewiesen werden können. Erst die Genauigkeitsuntersuchung mehrerer Folgeepochen wird diese Interpretation bestätigen können.

Neben dem bisherigen Nachweis von Höhenänderungen aus Präzisionsnivellements kommen nun GNSS-basierte 3D-Koordinatenänderungen als wichtiges Beurteilungskriterium über den räumlichen Verlauf von Bodenbewegungen hinzu. Darüber hinaus können durch den epochenverschiedenen Vergleich konkret nachbarschaftsbezogener Strecken auch Horizontalbewegungen von Deformationspunkten, ganz im Sinne des eingangs erwähnten gesetzlichen Auftrags des VermKatG NRW, nachgewiesen werden.

Als Folge der Erhebung von punktspezifischen Koordinatenänderungen ist eine Nachweisführung und Pflege dieser Informationen unabdingbar. Daher ist eine langfristige Datenhaltung anzustreben und in das Konzept der Lagedeformationsanalyse zu integrieren.

Die jeweils erste Wiederholungsepoche ist im Ruhrgebiet für 2016 und im Braunkohlerevier für 2017 vorgesehen.

LITERATUR

AdV (2014): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland, 25. 4. 2014. http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Festpunkte (02. 04. 2015).

Ahrens, B. (1988): Das Programmsystem MARKUS zur Auswertung dreidimensionaler Koordinaten. In: Forum, (1988)4, 448 – 466.

Ahrens, B. (2013a): Programmbeschreibung MARKUS, 10. 12. 2013 (unveröffentlicht).

Ahrens, B. (2013b): Anwendungshandbuch, DefoAWa, 10. 12. 2013 (unveröffentlicht).

Geef, D.; Lindstrot, W.; Ruf, B.; Spata, M. (1999): Zur Realisierung des Systems ETRS89 in Nordrhein-Westfalen – Die Bestimmung des NWREF-Netzes. In: Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV), (1999)3, 142 – 155.

Görres, B.; Campbell, J. (1998): Bestimmung vertikaler Punktbewegungen mit GPS. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 123(1998)7, 222 – 230.

Görres, B.; Sager, B.; Campbell, J. (2006): Geodätische Bestimmung von Bodenbewegungen im Bereich des Erftsprungsystems. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 131(2006)1, 16 – 24.

Haupt, P. (1999): 100 Jahre Leitnivellement – Die periodischen Wiederholungsnivellements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens. In: Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV), (1999)3, 184 – 201.

Heitmann, S.; Hovekamp, A.; Klein, W.; Mengede, S.; Musiedlack, J. (2012): Die Ermittlung von Bodenbewegungsgebieten in Nordrhein-Westfalen. In: Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV), (2012)2, 24 – 27.

Klostermann, J.; Kremers, J.; Röder, R. (1998): Rezente tektonische Bewegungen in der Niederrheinischen Bucht. In: Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., Krefeld, (1998)57, 557 – 571.

Klotz, S.; Sager, B. (2012): ViGO+ – Die graphische Oberfläche für WaSoft-Programme. In: Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV), (2012)2, 17 – 23.

Riecken, J.; Boje, R.; Schuler, H.-D.; Schaefer, W. (2011): Die Nutzung von Einfachmessungen für Präzisionsnivellements in Gebieten mit Bodenbewegungen in Nordrhein-Westfalen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 136(2011)1, 2 – 8.

Sager, B. (1995): Erste Deformationsanalyse des Lagenetzes Donatussprung in der Kölner Bucht. In: Vermessungswesen und Raumordnung (VR), 57(1995)6, 311 – 319.

Sager, B. (2013): Lagedeformation RheinBraun, Akte 2013.07, unveröffentlicht.

Sager, B. (2014): Lagedeformation Ruhrgebiet, Akte 2014.07, unveröffentlicht.

Sager, B.; Spata, M.; Strauch, K.; Schaefer, W. (2008): Das GPS-basierte Deformationsanalysenetz Rheydt-Odenkirchen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 115(2008)10, 328 – 332.

Spata, M.; Günther, G.; Klugmann, H. J.; Sager, B. (1993): Zur Deformationsanalyse der Erdoberfläche mittels GPS-Messungen beim Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. In: Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung (SPN), (1993)1, 2 – 9.

Ing. (grad.) Bernd Sager

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN
GEOBASIS NRW

Muffendorfer Straße 19 – 21 | 53177 Bonn
bernd.sager@brk-koeln.nrw.de