

# Eine interdisziplinäre Betrachtung der vertikalen Bodenbewegungen in der Eifel

Winfried Klein, Bernd Krickel, Jens Riecken und Martin Salamon

## Zusammenfassung

Das Verständnis für den »einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug« hat sich nach dem Abschluss des AdV-Projekts »Wiederholungsmessungen im Deutschen Haupthöhennetz (DHHN)« zu einer ganzheitlichen Betrachtungsweise der bislang getrennten geometrisch und dynamisch definierten Komponenten entwickelt. Mit dem vorliegenden Beitrag sollen die Ergebnisse des DHHN2016 aus geodätischer Sicht mit geologischen Erkenntnissen für den Bereich der Eifel verglichen werden. Es zeigt sich dabei, dass das Potenzial der Ergebnisse des DHHN durch interdisziplinäre Ansätze (hier am Beispiel der Geologie) wesentlich erschlossen wird.

Geologische Bewegungsraten zur Hebung der Eifel sind gut untersucht. Sie liegen bei 0,06 bis 0,38 mm/a für die letzten 800.000 Jahre. Geodätische Auswertungen von Präzisionsnivelllements zwischen 1960 und 1980 haben Hebungsraten von 0,6 bis 1,2 mm/a aufgezeigt (Mälzer et al. 1983). Die vorliegende Arbeit stützt sich einerseits auf die Wiederholungsmessungen im DHHN und auf ergänzende Präzisionsnivellements zwischen 1983 und 2007 und belegen Hebungsraten zwischen 0,75 und 1,25 mm/a. Die geodätisch ermittelten Hebungsraten sind um ein Vielfaches höher als die geologisch bestimmten, sie liegen in einer Größenordnung der Hebungsraten des Alpen-Orogen.

Diese Ergebnisse belegen eine beschleunigte Hebung der Eifel und damit eine starke geologische Aktivität am Westrand der Niederrheinischen Bucht. Möglicherweise könnten diese Hebungen, wie auch die anderer Mittelgebirge, auf elastische Verbiegungen der Lithosphäre zurückgeführt werden, wie dies bisher nur für Rift-Becken untersucht worden ist. Um die gemessenen, erheblichen Krustenbewegungen in Deutschland zu erklären, muss an neuen geologischen Modellen zur rezenten Krustendeformation geforscht werden, die auch die elastischen Parameter der Erdkruste berücksichtigen.

## Summary

*Professional understanding of official geodetic spatial reference in Germany has evolved consistently with the AdV project »Repeated measurements in the German main height network (DHHN)«. Nowadays this is called the »integrated geodetic spatial reference« as holistic conception of its geometrically and physically defined components. In this paper, the results of DHHN2016 are compared from the geodetic point of view with geological findings in the area of Eifel. As a result, the scientific potential of the DHHN results increases significantly through an interdisciplinary approach (here: Geodesy-Geology). The uplift of the Eifel region is geologically well studied. The determined uplift rates for the last 800.000 years range from 0,06 to 0,38 mm/a. Accurate geodetic measurements in the study area for the period from 1960 to 1980 determined uplift*

*rates in the Eifel of 0,6 to 1,2 mm/a (Mälzer et al. 1983). In this study, quite identical movement patterns and uplift rates between 0,75 and 1,25 mm/a for the time period from 1983 to 2007 were observed. Therefore the geodetic uplift rates of the Eifel region are several times higher than estimated by geological records. They are comparable to the recent uplift rates of the Alps. Potentially elastic deflection of the lithosphere may be a cause for the uplift of the upland regions north of the Alps. The effect of elastic deflection was so far only applied on rift basins.*

*The results imply an accelerated uplift of the Eifel region and also a strong, faultbound activity at the western margin of the Lower Rhine Embayment. The recent crustal movements measured during the geodetic DHHN campaign are significant. Therefore new geologic models of the recent crustal deformation are needed – models, that also take into consideration the elastic parameters of the crust.*

**Schlüsselwörter:** Geodätischer Raumbezug, Geologie, Neotektonik, Rezente Krustenbewegungen

## 1 Der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug

Die Geodäsie (altgriechisch γῆ gé »Erde« und δαίζειν daízein »teilen«) umfasst seit der Definition durch (Helmert 1880) die Bestimmung der geometrischen Figur der Erde (Geoid, Gelände), ihres Schwerefeldes und der Orientierung der Erde im Weltraum (Erdrotation). Helmert zielte damit bereits vor fast 150 Jahren auf eine ganzheitliche Betrachtungsweise der geometrischen und dynamischen Komponenten ab. Diese auf die Erdfigur ausgelegte Sicht wird im heutigen Verständnis der Geodäsie um die zeitliche Veränderung der genannten Komponenten erweitert und damit auch um die interdisziplinäre Nutzung

»Die Geodäsie ist die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche«  
(Helmert 1880)

»Gegenstand der Geodäsie ist die Vermessung und Visualisierung unserer Umwelt, die Analyse ihrer räumlichen und zeitlichen Veränderungen und die Verwendung dieser Informationen für vielfältige Aufgaben in Gesellschaft und Wissenschaft.«  
(DVW 2015)

Definition der Geodäsie

geodätischer Expertise für gesellschaftliche »Megathemen«. Dieses zeigt sich einerseits in der Entwicklung der Definition der Geodäsie aber auch in berufspolitischen Positionspapieren der Interessengemeinschaft Geodäsie anlässlich der INTERGEO® 2013 und 2014 zur Energiewende bzw. zur Modernisierung der Verkehrsinfrastruktur (IGG 2015).

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hatte bereits 2004 mit der Strategie für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in Deutschland auch die Schaffung aktueller Grundlagen für wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der rezenten Krustenbewegungen adressiert (AdV 2004). Diese Thematik wird wie folgt im Vorwort der »Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland« aufgegriffen (AdV 2014): »Aufgrund geodynamischer Prozesse und anthropogener Ursachen ist die Erdoberfläche Veränderungen unterworfen. Die dauerhaft vermarkten Festpunkte nehmen dabei an Bewegungen

Raumbezug postuliert. Das Qualitätsmanagement ist mit der erwähnten Richtlinie, die im Kern als Produktdefinition verstanden werden kann, auf den gesamten integrierten geodätischen Raumbezug übertragen worden (Heckmann et al. 2015, Kummer et al. 2014). Die Bedeutung eines Qualitätsmanagements, das in diesem Beitrag auch durch interdisziplinäre Ansätze näher betrachtet werden soll, kann in Anlehnung an die Strategie der AdV zur Bereitstellung der Geobasisdaten über Geodatendienste (AdV 2014) wie in Abb. 1 dargestellt werden.

## 2 Geodätische Betrachtungen der Hebungen in der Eifel

### 2.1 Messtechnische Grundlagen

Messtechnisch wurde der geodätische Bezugsrahmen in epochengleichen bundesweiten Messkampagnen aktualisiert. Dieses waren die Wiederholungsmessungen im DHHN von 2006 bis 2012, die GNSS-Messkampagne 2008 auf 250 Geodätischen Grundnetzpunkten sowie die Absolutschweremessungen 2009/2010 auf 100 dieser Punkte.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse des DHHN2016 zum DHHN92 zeigen deutschlandweite signifikante Höhenwertänderungen in einer Größe Benordnung von bis zu  $\pm 75$  mm (Jahn 2015), siehe Abb. 2.

In wieweit die dargestellten Höhenwertänderungen zwischen dem DHHN2016 und dem DHHN92 neben tatsächlichen vertikalen Bewegungen insbesondere auch systematische Fehlereinflüsse aus der »inhomogenen Entstehung des DHHN92« oder bisher unbekannte Einflüsse des Ausgleichungsmodells widerspiegeln, wird in der Gesamtbetrachtung der Ergebnisse des DHHN2016 an anderer Stelle zu diskutieren sein (in Vorbereitung für zfv 2016). Für den in dieser Arbeit untersuchten Bereich der Eifel soll aufgezeigt werden, dass sich die Höhenwertänderungen geodätisch als tatsächliche vertikale Bewegungen nachweisen lassen, wobei dies unabhängig durch geologische Untersuchungen gestützt wird. Dabei werden auch Präzisionsnivelllements herangezogen, die ergänzend zu den Realisierungen des Deutschen Haupthöhenetzes gemessen wurden.

Die nordrhein-westfälische Landesvermessung hatte bereits in den 70er Jahren aus Wiederholungsmessungen in den klassischen Nivellementnetzen Tendenzen für vertikale Bewegungen für den Bereich der Eifel erkannt und als Ursache sowohl geodynamische Prozesse aber auch für den nördlichen Eifelbereich anthropogene Ursachen als Folge des Tagebaus im Rheinischen Revier vermutet. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms »Rheinischer Schild« wurde ab Ende der 1970er Jahre auf eine signifikante Eifelhebung hingewiesen, wobei konkrete



Abb. 1: Regelkreis Qualitätssicherung zum Produkt »Geodätischer Raumbezug«

der Erdoberfläche teil. Durch das hohe Genauigkeitspotenzial der modernen Vermessungsverfahren lassen sich diese Bewegungen auch großräumig zuverlässig nachweisen; die vermarkten Festpunkte fungieren insofern auch als Geosensoren. Zur Qualitätssicherung des amtlichen geodätischen Bezugsrahmens sind Überwachungs- und Erhaltungsmaßnahmen sowie Wiederholungsmessungen erforderlich. Dabei festgestellte Bewegungen in den Festpunkten können zum einen dazu führen, dass die amtliche Realisierung des geodätischen Raumbezuges aktualisiert werden muss. Zum anderen sind signifikante vertikale und horizontale Bewegungen der Erdoberfläche auch für Zwecke des Umweltmonitorings und weiterer Geowissenschaften zu erfassen und entsprechend zu dokumentieren.«

Hiermit wird die Erfassung und Dokumentation als Gegenstand des Qualitätsmanagements für den geodätischen

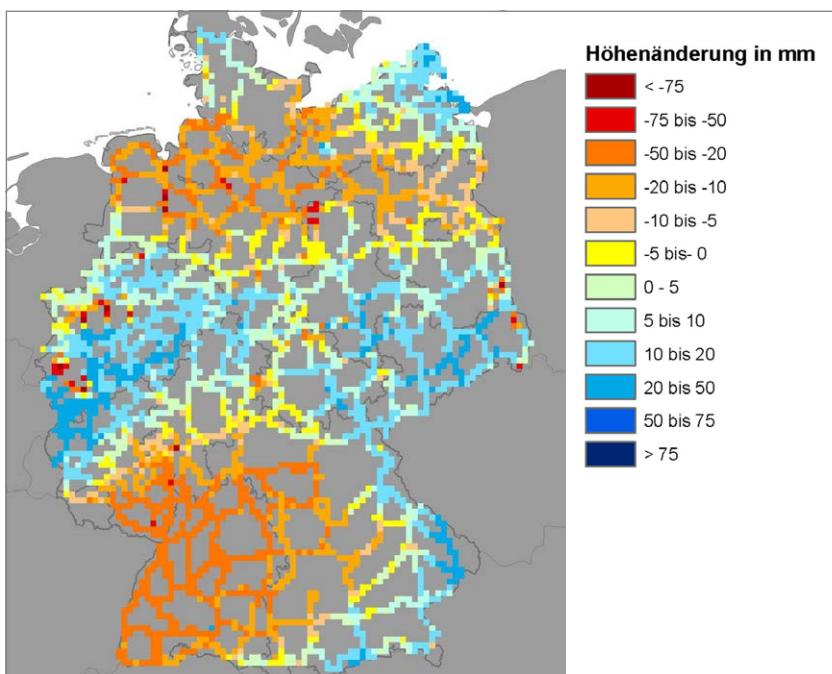


Abb. 2: Höhenwertänderungen DHHN2016 zum DHHN92 (Berechnung des BKG in 2015)

Hebungsbeträge aus Wiederholungsmessungen im Nivellementnetz 1. Ordnung zwischen 1922 und 1975 abgeleitet wurden (Mälzer et al. 1983). Die Landesvermessung Nordrhein-Westfalens griff diese und die eigenen Erkenntnisse auf und führte engmaschige periodisch wiederkehrende Präzisionsnivellierungen in den Jahren 1983, 1991, 1999, 2007 und 2015 aus. Einzellinien wurden als Teil des DHHN2016 auch im Jahr 2007 beobachtet. Zusätzlich liegen für einen geringen Teil des Netzes – Linien des ehemaligen Nivellementnetzes 1. Ordnung – Messdaten seit den 60er Jahren vor, erste Linien wurden 1933 beobachtet und wurden zum Teil auch im DFG-Schwerpunktprogramm »Rheinischer Schild« analysiert (Mälzer et al. 1983).

Für die Beobachtungen im Nivellementnetz 1. Ordnung beziehungsweise in den Messungen zum DHHN wurden Präzisionsnivelliere höchster Genauigkeit genutzt, bis in die frühen 1980er Jahre Libellennivelliere, danach Kompensatornivelliere und heute ausschließlich digitale Kompensatornivelliere mit automatischer Lattenablesung. Als Präzisionsnivelliere müssen alle genannten Nivelliere einen mittleren Fehler für 1 km Doppelnivellement von weniger als  $\pm 0,5$  mm (Deumlich 1972, Witte und Schmidt 1989, Spata et al. 2008) erreichen. Aktuell verlangt die »vorläufige Richtlinie für die Ausführung der Nivellements in Nordrhein Westfalen« (Geobasis NRW 2015), dass digitale Kompensatornivelliere mit einer Standardabweichung von  $< 0,4$  mm für einen Kilometer Doppelnivellement eingesetzt werden.

Die in dieser Arbeit genutzten Beobachtungen des Eifel-Netzes sind die erwähnten Präzisionsnivellierungen der Jahre 1983 und 2007, da Teile dieser Beobachtungen auch in das DHHN92 beziehungsweise DHHN2016 eingeflossen sind. Der Beobachtungsraum Eifel wird damit in

der vorliegenden Arbeit unmittelbar zu den in Abb. 2 gezeigten Höhenänderungen des DHHN2016 zum DHHN92 in Bezug gesetzt. Der alternative Ansatz einer »kinematischen Auswertung« der beobachteten Höhenunterschiede nach Mälzer und Zippelt (1979) oder Fuhrmann et al. (2014a, 2014b) wird nicht verfolgt.

Konkret sollen, gerade auch wegen der geologischen Betrachtungen, je eine Messungslinie quer und längs zur Hauptfaltungsrichtung der Eifel näher untersucht werden.

## 2.2 Analyse ausgewählter Messlinien

Als erster Analyseschritt wird für die Linien »L1« (Simmerath-Düren) und »L2« (Aachen-Blankenheim) entlang der Nivellementwege die jeweilige höhenkinematische Komponente der Erdoberflächenbewegung als Vertikalbewegung in Millimeter pro Jahr [mm/a] berechnet.

Die Quantifizierung der jährlichen Vertikalbewegung ist unmittelbar von der Lagerung, also der Datumsfestlegung des Nivellementnetzes auf einen stabilen Referenzpunkt abhängig, der auch geologisch stabil sein muss. Unerkannte bzw. unbekannte geologische Prozesse würden ansonsten wie eine Additionskonstante die zu untersuchenden Vertikalbewegungen im Beobachtungsraum »Eifel« überlagern. Die bisherigen Auswerteansätze, bei denen die Lagerung des Eifel-Netzes in der als stabil angenommenen Aachener Kirche St. Adalbert vorgenommen wurde, sind zu prüfen. Hierzu erfolgt eine Auswertung der aus den Nivellementsrohdaten abgeleiteten Höhenunterschiede entsprechend der Vorgaben im DHHN (Spata et al. 2008) entlang der Linien des DHHN92 (Messungsjahr 1983) und des DHHN2016 (Messungsjahr 2007) von Aachen zum Datumspunkt Wallenhorst in Niedersachsen. Dabei zeigt sich, dass der in den bisherigen Berechnungen als stabil angenommene lokale Datumspunkt »Aachener St. Adalbert-Kirche« des Eifel-Netzes eine Hebung von ca. 14 mm erfahren hat, sodass dieser die Anforderungen an einen Datumspunkt nicht erfüllt. Ferner wurde im Rahmen der DHHN2016-Auswertung auch für den Anschlusspunkt Wallenhorst eine geringe Hebung festgestellt. In diesem Zusammenhang sei auf die noch ausstehende Dokumentation des Arbeitskreises Raumbezug zur Berechnung des DHHN2016 und begleitende Veröffentlichungen verwiesen (u.a. Jahn (2015) und in Vorbereitung zfv 2016). In Summe ergibt sich für den lokalen Datumspunkt Aachener St. Adalbert-Kirche eine jährliche Vertikalbewegung von ca. + 0,75 mm/a. In den Folgeberechnungen, bei denen die Messungselemente der Epochen rechnerisch über den Anschlusspunkt Aachener St. Adalbert-Kirche verknüpft sind, wird dessen Hebeungsverhalten von + 0,75 mm/a mit berücksichtigt.

Aus den Epochenvergleichen des Eifel-Netzes (Abb. 3) werden für die Punkte entlang der ausgewählten Linien L1 und L2 Vertikalbewegungen dargestellt, wobei die Hintergrundfarbe in den Abb. 4 und 5 in Analogie zur Wahl der Farbklassen (= absolute Vertikalbewegung) der Auswertung des bundesweiten DHHN2016 aus Abb. 2 gesetzt wird. Zusätzlich werden in den Abb. 4 und 5 die zugehörigen Höhenprofile ausgewiesen.

Für Linie L1 (Simmerath–Düren) wird insbesondere der anthropogene Einfluss des Tagebaus im Rheinischen Revier deutlich. Ansonsten ist diese Linie einer relativ gleichmäßigen Hebung zwischen 1,0 mm bis 1,7 mm pro Jahr ausgesetzt. Die geologische Wertung erfolgt in Abschnitt 3.

Für die dazu etwa senkrecht verlaufende Linie L2 (Aachen–Blankenheim), die sich über einen großen Teil der Nordeifel erstreckt, bestätigen sich die im DHHN2016 aufgezeigten Hebungen (Abb. 2) in einer Größenordnung von 0,7 mm bis 1,5 mm pro Jahr, teilweise mit einer augenscheinlichen Korrelation zum Höhenprofil. Bei den zugrunde liegenden Höhenfestpunkten dieses Linienverlaufs L2 können sieben Punkte, also 5 % der insgesamt 140 Höhenfestpunkte, als »Ausreißer« identifiziert werden, die in der Abb. 5 bereits eliminiert sind. Sie unterliegen wegen örtlicher Besonderheiten atypischen Bewegungen, verursacht beispielsweise durch Setzungen an zwischenzeitlich neu errichteten Pfeilern, und sind daher für die vorliegende großräumige Untersuchung der Hebungen ungeeignet.

### 2.3 Großräumige Analysen

Als zweiter Analyseschritt wird aus den Vertikalbewegungen ein Isolinienbild für den gesamten Beobachtungsraum »Eifel« abgeleitet. Die Erfahrungen aus dem ersten Analyseschritt bezüglich punktueller Ausreißer machen deutlich, dass der Beobachtungsraum, also jede in Abb. 3 dargestellte Linie, einer Ausreißerdetektion unterzogen werden muss. Hierbei wird jeder Linienabschnitt einzeln betrachtet. Unter der Annahme, dass in diesen relativ kleinräumigen Gebieten eine gleichförmige Vertikalbewegung stattfindet, wurden diese aus einer linearen Regression abgeleitet und anschließend wurde die zugehörige Standardabweichung bestimmt. Zur Ausreißerdetektion werden alle Messwerte entlang des jeweiligen Linienabschnitts da-

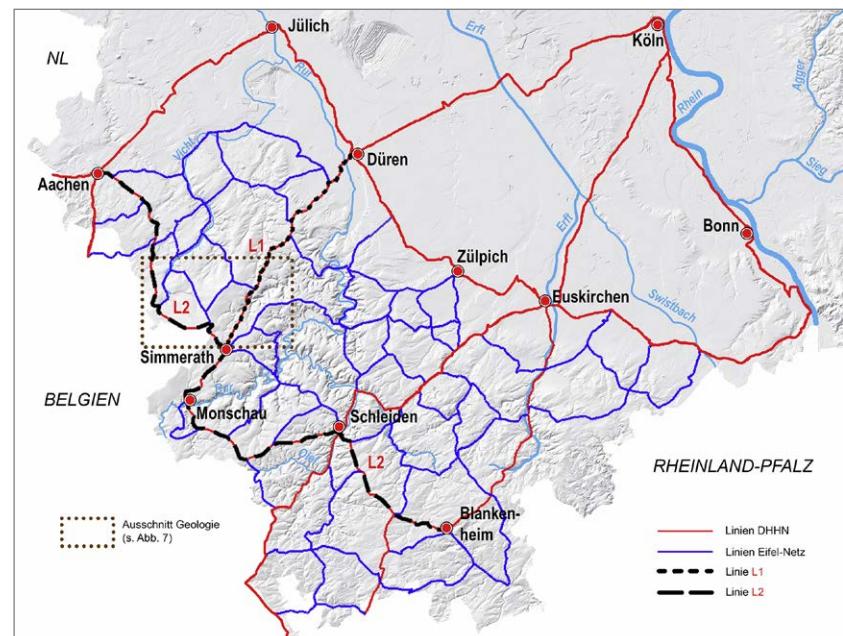


Abb. 3: Beobachtungsraum »Eifel«, Linien des Präzisionsnivelllements, Kartengrundlage: Digitales Geländemodell NRW (DGM)

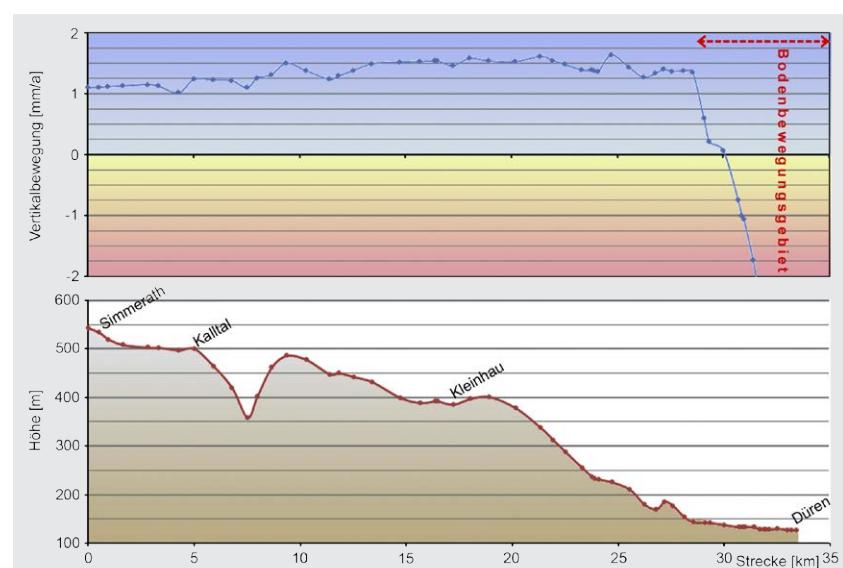


Abb. 4: Darstellung Linie L1 (Simmerath–Düren)

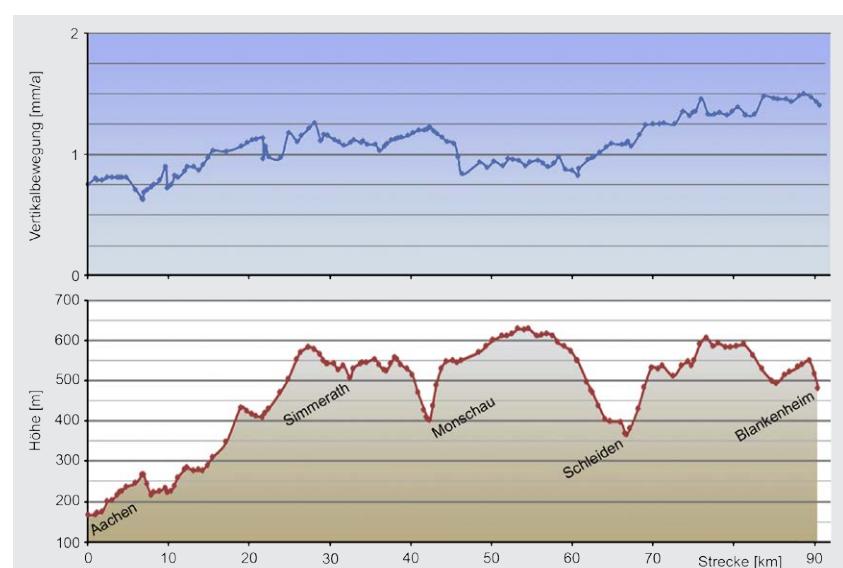


Abb. 5: Darstellung Linie L2 (Aachen–Blankenheim)

hingehend überprüft, ob sie im Bereich der doppelten Standardabweichung liegen. Über alle Linienelemente des Eifel-Netzes hinweg werden bei dieser Methode von 1.146 Einzelpunkten als Ausreißer identifiziert und eliminiert. Durch die Eliminierung der Ausreißer wird des Weiteren eine Glättung des Isolinienbildes (Abb. 6) erreicht, sodass das großräumige Hebungsverhalten besser dargestellt wird.

Das Isolinienbild stellt die Vertikalbewegungen für den Beobachtungsraum »Eifel« dar. Wegen der geringen Dichte von DHHN-Messpunkten im nordöstlichen Abbildungsbereich (vgl. Abb. 3), wird die Isolinendarstellung auf die Hebungsgebiete (bis zur Null-Linie) begrenzt. Wegen der zeitlichen und räumlichen Diskretisierung ist der damit »ausgeklammerte« Senkungsbereich im Detail nicht gleichzusetzen mit den aktuellen Bodenbewegungsgebieten, wie sie in Heitmann et al. (2012) beschrieben sind.

Bei der Darstellung der Vertikalbewegungen durch Isolinien fällt auf, dass die südwestlichen und zentralen Bereiche des Beobachtungsraums Eifel in einer Hebungszone zwischen 1,0 und 1,25 mm/a liegen, einzelne kleinere Gebiete – von der 1,25 mm/a-Isolinie umgeben – ragen mit Hebungen bis zu 1,5 mm/a heraus. Von Nordwesten beginnend im Raum Aachen liegen die festgestellten Hebungen unter 1,0 mm/a, dabei verläuft die 0,75er Isolinie erwartungsgemäß genau durch Aachen.

Die hier dargestellten Vertikalbewegungen, abgeleitet aus aktuellen DHHN-Messungen nach 1983, bestätigen die Tendenzen der aus früheren Untersuchungen gewonnenen Vertikalbewegungen, wie sie durch Mälzer et al. (1983) aus älterem Datenmaterial prognostiziert wurden.

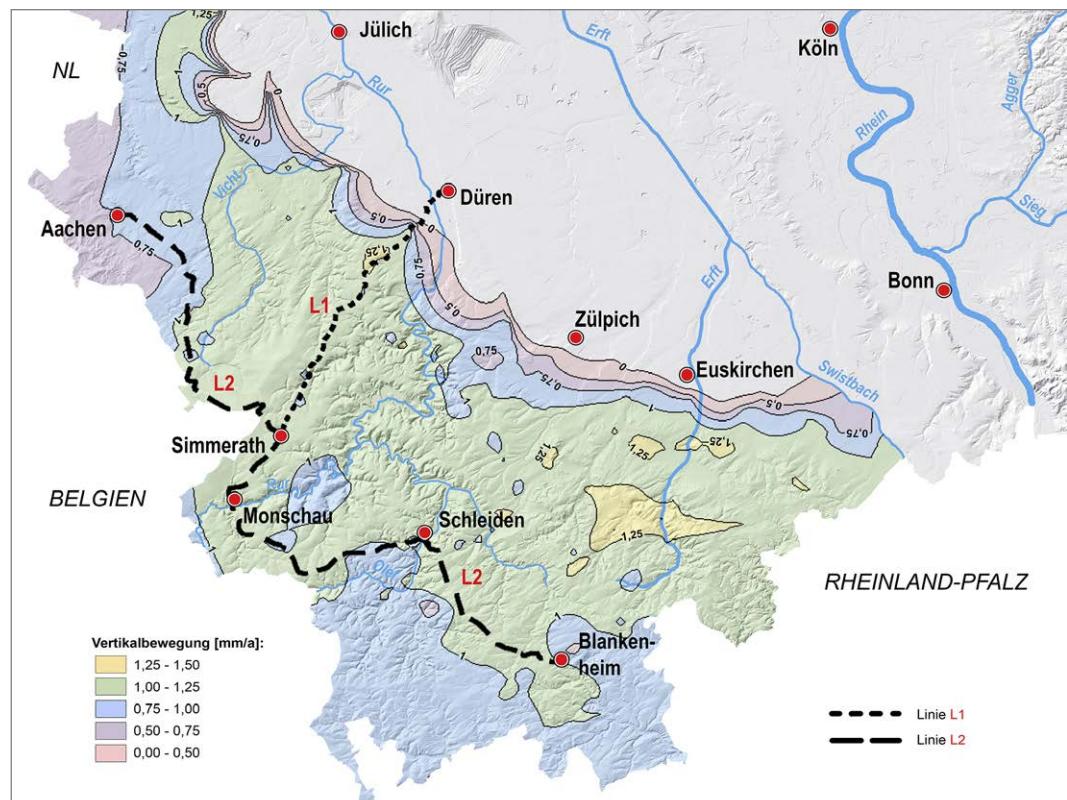


Abb. 6: Vertikalbewegungen [mm/a]

(NRB), die sich seit ca. 34 Millionen Jahren langsam einsetzt. Diese Bewegungen sind an große Störungssysteme gebunden und werden von reger Erdbebenaktivität begleitet. Die geologischen Bewegungsraten in der NRB an diesen großen Störungen liegen bei etwa  $-0,08 \text{ mm/a}$  (van den Berg et al. 1994, van den Berg 1994, Geluk et al. 1994). Die NRB ist durch diese Bewegungen bedingt mit jungen tertiären und quartären Lockersedimenten (34 bis 0 Millionen Jahre alt) gefüllt.

Die Eifel und das Rheinische Schiefergebirge werden überwiegend von sehr alten devonischen Gesteinen aufgebaut (416 bis 360 Millionen Jahre alt), die während der variskischen Gebirgsbildung gefaltet und geschiefert wurden. Sie waren während der Erdgeschichte mehrere Kilometer tief versenkt und liegen jetzt durch vielfältige Hebungsprozesse wieder an der Erdoberfläche. In bis zu 1,5 km Tiefe wird der tiefere Untergrund unter der NRB aus diesen alten Gesteinen aufgebaut. In geologisch junger Zeit (ca. die letzten zwei Millionen Jahre) haben sich Eifel und das Rheinische Schiefergebirge stark gehoben und bilden jetzt Mittelgebirge, die durch junge Kerbtäler zerstört werden. Gleichzeitig zur Hebung begann die Erosion, diese Hochgebiete wieder abzutragen. Die Hebungsprozesse können sich rezent weiter fortsetzen, sind aber geologisch noch nicht dokumentiert (es liegen keine Ablagerungen dazu vor). Hier sind geodätische Messergebnisse von großer Bedeutung.

Nach der Etablierung der Theorie der Plattentektonik in den 1970er Jahren als Motor für Entstehung von Orogenen (»Hochgebirgen«) an Plattengrenzen und die endogene Dynamik der Erde trat die geologische Frage

### 3 Die Hebungen der Eifel aus geologischer Sicht

#### 3.1 Geologischer Überblick

Der geologische Aufbau von Nordrhein-Westfalen ist komplex und vielfältig. Der Süden wird geprägt durch die Eifel/Ardennen im Westen und das Rheinische Schiefergebirge im Osten, die sich beide in geologisch junger Zeit stark gehoben haben und jetzt typische Mittelgebirgslandschaften bilden. Sie werden getrennt durch das junge, aktive Riftgebiet der Niederrheinischen Bucht

auf, wie es innerhalb von stabilen Kontinentalplatten zu Hebungsprozessen von Mittelgebirgen kommen kann – eine Frage, die die Theorie der Plattentektonik erst einmal nicht beantworten konnte. Hierzu wurde speziell das Rheinische Schiefergebirge und die Eifel/Ardennen-Region in mehreren interdisziplinären Forschungsvorhaben durch zwei Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft geodätisch, geophysikalisch und geologisch untersucht. Die Ergebnisse wurden in Fuchs et al. (1983) und Neugebauer (1998) publiziert. Geologisch betrachtet ist die Eifel ein umfangreich und gut untersuchtes Arbeitsgebiet.

Die Forschungsergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Tektonische, an Störungssysteme gebundene Bewegungen bei der Hebung des Rheinischen Schildes kommen nur in kleinen, tektonisch aktiven Gebieten vor, wie die Andernacher Störung oder an den Rändern des Limburger und Neuwieder Beckens. Ansonsten erfolgt die Hebung des Rheinischen Schildes ungestört und schildförmig (Semmel 1983, Bibus 1980).

Die Lithosphäre unter der Eifel und dem Rheinischen Schiefergebirge zeigt keinen erkennbar erhöhten Wärmefluss, sie zeigen aber einen unterschiedlichen Aufbau. Unter der Eifel gibt es im Oberen Mantel einen Low-Velocity-Bereich, der mit einer geringen Teilaufschmelzung des Erdmantels zu erklären ist (Raikes und Bonjer 1983). Ein solcher Low-Velocity-Bereich ist unter dem rechtsrheinischen Schiefergebirge nicht vorhanden (Raikes und Bonjer 1983, Fuchs und Wedepol 1983). Die errechneten Mantelinhomogenitäten reichen nur für die Eifel aus, um die Mittelgebirgshebung zu erklären. Als Haupterklärungsmodell für die Hebungsprozesse in der Eifel wurde von einem Mantle Plume in der Südlichen Eifel ausgegangen, der für den quartären Vulkanismus der Eifeler Vulkanfelder verantwortlich ist (Raikes und Bonjer 1983, Fuchs und Wedepol 1983). Dieser Mantle Plume wurde durch seismische Tomographie von Ritter (1999) und Ritter et al. (2000) nachgewiesen. Von seiner Größe und vom Wärmetransport ist er relativ klein. Dieses Erklärungsmodell gilt nur für die Eifel und kann die Hebung des Rheinischen Schiefergebirges nicht erklären.

### 3.2 Rezente Hebung der Eifel

Die quartärzeitliche Hebung der Eifel wurde intensiv und detailliert in den Arbeiten von Meyer und Stets (1998, 2002) und van Balen et al. (2000) anhand fossiler Terrassensedimente untersucht. Sie kommen für den hier untersuchten Raum für die letzten 800.000 Jahre auf Hebungsgraten von ca. 50 m bei Aachen bis hin zu ca. 225 m im Süden des in dieser Arbeit untersuchten Gebietes. Dies entspricht Bewegungsgraten von 0,06 mm/a bis ca. 0,38 mm/a.

Von tektonischen Störungssystemen gesteuerte Bewegungen treten dabei erst am Rande zur NRB auf, nicht aber innerhalb der Eifel. Aktuelle Untersuchungen bei der geologischen Neukartierung der Nordeifel durch den Geologischen Dienst NRW belegen für den Bereich des Vennsattels eine dicke, quartäre Fließerdedecke, die erst vor kurzem durch die Täler des Hasselbachs, der Weser und des Solchbachs zerschnitten und abgetragen wurde (Abb. 7). Dies ist ein Indiz für eine sehr junge und sehr schnelle Hebung in diesem Bereich, die bisher jedoch noch nicht quantifiziert wurde.

Rezente Hebungsgraten wurden von Mälzer et al. (1983) aus geodätischen Beobachtungen im Messzeitraum zwischen 1960 und 1980 abgeleitet. Dabei stellen sie für das hier untersuchte Gebiet Hebungsgraten von 0,6 mm/a im Norden und 1,2 mm/a im Süden fest. Die in der vorliegenden Untersuchung für den Messzeitraum 1983 bis 2007 gewonnenen Bewegungsgraten liegen zwischen 0,75 mm/a bei Aachen und bis 1,25 mm/a im Hohen und bei Blankenheim. Sie zeigen ein vergleichbares Verteilungsmuster und gleiche Bewegungsgraten und bestätigen die Untersuchungen von Mälzer et al. (1983) sowie Mälzer und Zippelt (1979).

Zur Zeit des aktiven Vulkanismus in der Eifel waren die Hebungsgraten der Eifel, wie die Untersuchungen von Meyer und Stets (1998, 2002) zeigen, um das fünf- bis zehnfache kleiner als die heute gemessenen Werte. Die aktuellen, gemessenen Hebungsgraten der Eifel belegen eine stark beschleunigte Hebung, die Bewegungsgraten sind dabei weitgehend identisch mit rezent gemessenen Hebungsgraten in den Zentralalpen (Delacou et al. 2004, Persaud und Pfiffner 2004, Pfiffner 2009). Sie quantifizieren damit die bereits angesprochene Prognose einer beschleunigten Hebung, wie sie bei der geologischen Neukartierung der Nordeifel durch den Geologischen Dienst NRW abgeleitet wurde.

Die Messlinie L1 von Simmerath nach Düren (Abb. 4) verläuft parallel zur Hauptfaltenachsenrichtung der Eifel und senkrecht zu den aktiven Störungssystemen der

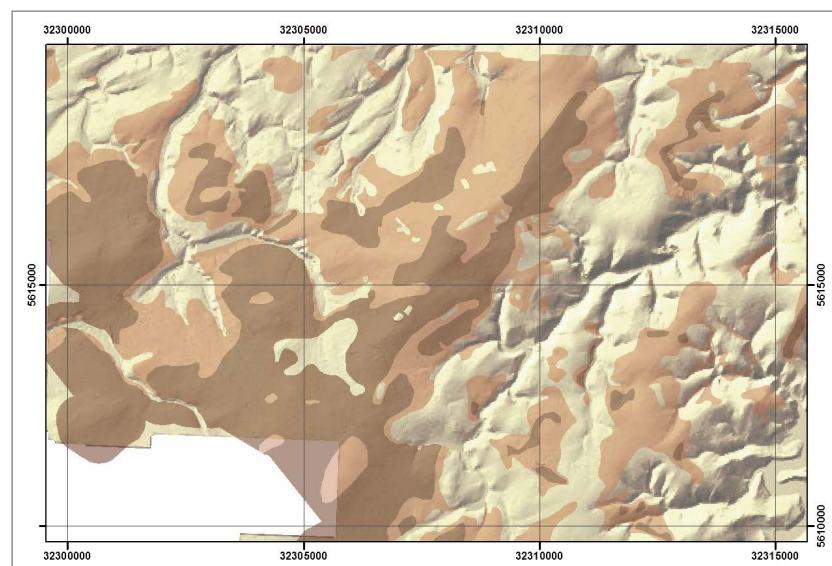


Abb. 7: Fließerdemächtigkeiten im Vennsattel der nördlichen Eifel: hellbraun  $\hat{=}$  1–2 m Mächtigkeit, dunkelbraun  $\hat{=}$  >2 m Mächtigkeit, Kartierung GD NRW

NRB. Sie zeigt ein sehr gleichförmiges Hebungsverhalten der Eifel in Süd/West-Nord/Ost-Richtung. Die Hebungs-raten liegen im SW bei etwa 1 mm/a und steigen dann bis an die Randstaffelbrüche der Rurscholle bei Düren auf 1,7 mm/a an. Es findet also rezent eine deutliche Rotationsbewegung der Eifel in Süd/West-Nord/Ost-Richtung statt, begrenzt durch die Randstaffeln der Rurscholle. Eine einfache geologische Erklärung hierfür ist die Block-rotation der Liegendscholle der östlichen Randstaffeln der Rurscholle, bedingt durch Prozesse des »footwall-uplifts«, wie sie aus aktiven Riftbecken bekannt sind (Kusznir et al. 1991, Yielding und Roberts 1992). Dies würde implizieren, dass die westlichen Randstaffeln der Rurscholle zurzeit tektonisch mit hohen Bewegungsraten aktiv sind. Aus dem Maß »footwall-uplift« kann mit dem Flexural-Cantilever-Modell auf die Absenkungsraten an den Störungen geschlossen werden. Aus den gemessenen Hebungs-raten resultieren nach dem Flexural-Cantilever-Modell (Yielding und Roberts 1992) Absenkungsraten an den östlichen Randstaffeln der Rurscholle zwischen -0,09 bis -5,4 mm/a je nach Modellansatz. Sie liegen im Mittel bei ca. -3 mm/a Absenkung. Dies geht weit über das bekannte geologische Maß von -0,08 mm/a hinaus (van den Berg et al. 1994, van den Berg 1994, Geluk et al. 1994). Direkt können diese Bewegungen, bedingt durch großräumige Sümpfungsaktivität der Braunkohlen-tagebau in der NRB, nicht mehr gemessen werden. Allerdings liegen hierzu geodätische Messungen und deren geologische Deutungen für den Messzeitraum 1933 bis 1952 vor (Qitzow 1956), die unbeeinflusst durch den Braunkohlentagebau sind. Sie belegen ein sehr ähnliches Bewegungsverhalten für die Linie Simmerath–Düren, wie in der vorliegenden Arbeit festgestellt. An den östlichen Randstaffeln der Rurscholle konnten für den Messzeitraum 1933 bis 1952 Bewegungsraten von -2,7 mm/a festgestellt werden. Auch diese gemessenen Werte gehen über das geologisch dokumentierte Maß hinaus und wurden bisher von der Fachwelt weitgehend ignoriert.

Die Messlinie L2 verläuft Nord/West-Süd/Ost von Aachen nach Blankenheim, also etwa senkrecht zur Linie L1 und zur Hauptfaltenachsenrichtung der Eifel (s. Abb. 5). Das Hebungsprofil der L2-Linie unterscheidet sich deutlich vom der L1-Linie. Die Hebungs-raten schwanken wellenförmig zwischen 0,7 mm/a und 1,5 mm/a. Die Wellenlänge dieser ungleichförmigen von Nord/West nach Süd/Ost gerichteten Hebung liegt bei etwa 50 km. Überlagert von dieser »Wellung« steigt die Hebungsrate nach Süd-Osten leicht an. Ein geologisches Erklärungsmodell für diese wellenförmigen Verbiegungen der Erdkruste gibt es zunächst nicht. Möglicherweise reagiert hier die Erdkruste wie im Flexural-Cantilever-Modell (Yielding und Roberts 1992) elastisch, allerdings im Regime einer Einengungstektonik, bedingt durch die rezenten Hauptspannungsrichtung.

Die Ursachen für diese stark beschleunigte Hebung der Eifel sind noch nicht abschließend geklärt. Auch gibt es immer noch offene Fragen zur Entstehung der Mittelge-

birge im intrakontinentalen Bereich nördlich der Alpen. Die aus den Messungen zum DHHN2016 abgeleiteten Vertikalbewegungen in Deutschland sind erheblich (Abb. 2). Diese langwelligen Verbiegungen könnten auch auf eine elastische Krustenverbiegung im Vorfeld der Alpen hin-deuten – auch solche Prozesse kommen für die Hebung der Mittelgebirge in Betracht und wurden bisher noch nicht weiter geologisch untersucht. Im Gegensatz zur den epirogenen Bewegungen im intrakontinentalen Bereich liegen für Riftbecken Modelle und Untersuchungen vor, die diese elastischen Krustenparameter berücksichtigen (Kusznir et al. 1991, Yielding und Roberts 1992). Hier bie-tet sich möglicherweise ein umfassenderer Lösungsansatz für die Hebung der Mittelgebirge nördlich der Alpen an.

#### 4 Ausblick

Der vorliegende vielversprechende interdisziplinäre An-satz des Nachweises und der Interpretation von geolo-gischen Vertikalbewegungen – hier für den nordrhein-westfälischen Bereich der Eifel – belegt eine beschleunigte Hebung der Eifel und eine starke geologische Aktivität am Westrand der Niederrheinischen Bucht. Dies sollte bei zukünftigen neotektonischen und seismischen Untersu-chungen berücksichtigt werden.

Es ist vorgesehen, eine interdisziplinäre Untersuchung auf ganz Nordrhein-Westfalen auszuweiten. Ergänzend sollen die Vertikalbewegungen der SAPOS-Referenzsta-tionen analysiert werden, wozu die langzeitarchivierten Daten für eine unabhängige Kontrolle auf geeignete nordrhein-westfälische DHHN-Datumspunkte aufgef-el-dert und reprozessiert werden sollen. Es zeichnet sich ab, dass auch andere Mittelgebirgshebungen bezifferbar und über diesen Ansatz erklärbar sind.

Um die gemessenen, erheblichen Krustenbewegungen in Deutschland zu erklären, muss an neuen geologischen Modellen zur rezenten Krustendefor-mation geforscht werden, die auch die elastischen Parameter der Erdkruste berücksichtigen. Eine Gesamtanalyse »rezente Krustenbe-wegungen Deutschland« sollte mittelfristig mit den Daten der Messungen zum DHHN2016 (Abb. 2) erfolgen, was vor dem Hintergrund der föderalen Struktur nicht nur wissenschaftliche Anstrengungen erfordert.

Die bereits zitierte Aussage im Vorwort zur »Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raum-bezug« (AdV 2014) wird bestätigt: »Zum anderen sind signifikante vertikale und horizontale Bewegungen der Erdoberfläche auch für Zwecke des Umweltmonitorings und weiterer Geowissenschaften zu erfassen und entspre-chend zu dokumentieren.« Als Fazit bleibt festzuhalten, dass hierfür auch in Zukunft Messungen im geodätischen Raumbezug erforderlich sein werden, ob nun klassische terrestrische oder in Ergänzung auch Fernerkundungsme-thoden, wobei insbesondere das Potenzial der Radarin-terferometrie noch zu erschließen ist (Riecken und Busch 2015, Fuhrmann et al. 2015).

## Literatur

- AdV: »Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland«, [www.adv-online.de](http://www.adv-online.de), 2014.
- AdV: Strategie der AdV zur Bereitstellung der Geobasisdaten über Geodatendienste, Version 0.7, Stand 26.02.2014.
- AdV: Vorbericht zu Top 4.3 »Erneuerung des DHHN« der 115. AdV-Plenumstagung (intern), 2004.
- Bibus, E.: Distribution and Dimension of Young Tectonics in the Neuwied Basis and the Lower Middle Rhine. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.): Plateau Uplift – The Rhenish Shield – A Case Study, S. 55–61, Springer, Berlin, 1983.
- Delacou, B., Sue, C., Champagnac, J.D., Burkhard, M.: Present-day geo-dynamics in the bend of the western and central Alps as constrained by earthquake analysis. *Geophys. J. Int.*, 158, S. 753–774, 2004.
- Deumlich, F.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1972.
- DVV: [www.dvv.de/rubrik/beruf/180](http://www.dvv.de/rubrik/beruf/180), 2015.
- Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.): Plateau Uplift – The Rhenish Shield – A Case Study, Springer, Berlin, 1983.
- Fuchs, K., Wedepol, K. H.: Relation of Geophysical and Petrological Models of Upper Mantle Structure of the Rhenish Massif. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.): Plateau Uplift – The Rhenish Shield – A Case Study, S. 352–364, Springer, Berlin, 1983.
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., van Leijen, F.J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R.F., Heck, B.: Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, Levelling and GNSS data. *Geophys. J. Int.*, 203, S. 614–631, 2015.
- Fuhrmann, T., Westerhaus, M., Zippelt, K., Heck, B.: Vertical displacement rates in the Upper Rhine Graben area derived from precise leveling. *Journal of Geodesy*, 88, S. 773–787, 2014.
- Fuhrmann, T., Zippelt, K., Heck, B.: Historische Nivellements aus Preußen und Baden und ihre Bedeutung für die Bestimmung von Vertikalbewegungen im Oberrheingrabengebiet. *zfv* 6/2014, S. 389–397, 2014.
- Geluk, M.C., Duin, E.J. Th., Dusar, M., Rijkers, R.H.B., Van den Berg, M.W., Van Rooijen, P.: Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben. *Geologie en Mijnbouw*, 73, S. 129–141, 1994.
- Geobasis NRW: Vorläufige Richtlinien für die Ausführung der Nivellements in Nordrhein-Westfalen (interne Arbeitsanweisung), 2015.
- Heckmann, B., Berg, G., Heitmann, S., Jahn, C.-H., Klauser, B., Liebsch, G., Liebscher, R.: Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert. *zfv* 3/2015, S. 180–184, 2015.
- Heitmann, S., Hovekamp, A., Klein, W., Mengede, S., Musiedlak, J.: Die Ermittlung von Bodenbewegungsgebieten in Nordrhein-Westfalen. *NÖV* 2/2012, S. 24–27, 2012.
- Helmert, F.: Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie. Teubner, 1880.
- IGG: [www.ig-geodaeisie.de/positionen.html](http://www.ig-geodaeisie.de/positionen.html), 2015.
- Jahn, C.-H.: Aktuelle Entwicklungen im geodätischen Raumbezug Deutschlands. *fub* 5, S. 201–208, 2015.
- Kummer, K., Kötter, T., Eichhorn, A. (Hrsg.): Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2015 – Kapitel 5 Geodätischer Raumbezug (Heckmann/Jahn). Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 2014.
- Kuszniir, N.J., Marsden, G., Egan, S.S.: A flexural-cantilever simple-shear/pure-shear model of continental lithosphere extension: applications to the Jeanne d'Arc Basin, Grand Banks and Viking Graben, North Sea. In: Roberts A.M., Yielding, G., Freeman, B. (Hrsg.): The Geometry of Normal Faults, Geological Society Publication, 56, S. 41–60, Washington, 1991.
- Mälzer, H., Hein, G., Zippelt, K.: Height Changes in the Rhenish Massif: Determination and Analysis. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.): Plateau Uplift – The Rhenish Shield – A Case Study, S. 164–176, Springer, Berlin, 1983.
- Mälzer, H., Zippelt, K.: Local Height Changes in the Rhenish Massif Area. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 86. Jahrgang, Heft 10, S. 402–405, 1979.
- Meyer, W., Stets, J.: Young Pleistocene to Recent Uplift in the Rhenish Massif. In: Neugebauer, H.J. (Hrsg.): Young Tectonics – Magmatism – Fluids. A Case Study of the Rhenish Massif. Publications of SFB 350, 74, Bonn, 1998.
- Meyer, W., Stets, J.: Pleistocene to Recent tectonics in the Rhenish Massif (Germany). *Netherlands Journal of Geoscience/Geologie en Mijnbouw*, 81 (2), S. 217–221, 2002.
- Neugebauer, H.J. (Hrsg.): Young Tectonics – Magmatism – Fluids. A Case Study of the Rhenish Massif. Publications of SFB 350, 74, Bonn, 1998.
- Persaud, M., Pfiffner O.A.: Active deformation in the eastern Swiss Alps: post-glacial faults, seismicity and surface uplift. *Tectonophysics*, 385, S. 59–84, 2004.
- Pfiffner, O.A.: Geologie der Alpen. Haupt Verlag, 2009.
- Quitzow, H.W.: Die jungen Deckschichten des Tieflandes. In: Schröder, E., Schmidt, W., Quitzow, H.W.: Geologische Heimatkunde des Dürener Ländchens, Düren, 1956.
- Raikes, S., Bonjer, K.-P.: Large-Scale Mantle Heterogeneity Beneath the Rhenish Massif and Its Vicinity from Teleseismic P-residual Measurements. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.): Plateau Uplift – The Rhenish Shield – A Case Study, S. 315–331, Springer, Berlin, 1983.
- Riecken, J., Busch, W.: Bodenbewegungskataster – Implementierungsansatz eines künftigen Produktes der Landesvermessung NRW. Tagungsband GeoMonitoring 2015, S. 15–24, 2015.
- Ritter, J.: Rising Through Earth's Mantle. *Science* 286, S. 1865–1866, 1999.
- Ritter, J., Jordan, M., Christensen, U., Achauer, U.: A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany. *Earth and Planetary Science Letters*, 186, S. 7–17, Elsevier, 2000.
- Semmel, A.: The Early Pleistocene Terrasses of the Upper Middle Rhine and Its Southern Foreland – Questions Concerning Their Tectonic Interpretation. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.): Plateau Uplift – The Rhenish Shield – A Case Study, S. 49–54, Springer, Berlin, 1983.
- Spata, M., Schuler, D., Riecken, J.: Zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) 2006–2011 und der Anteil von Nordrhein-Westfalen. *NÖV* 3/2008, S. 22–32, 2008.
- Van Balen, R.T., Houtgast, R.F., Van der Wateren, F.M., Vandenberghe J., Bogaart, P.W.: Sediment budget and tectonic evolution of the Meuse catchment in the Ardennes and the Roer Valley Rift System. *Global and Planetary Change*, 27, S. 113–129, 2000.
- Van den Berg, M.W.: Neotectonics of the Roer Valley rift system. Style and rate of crustal deformation inferred from syn-tectonic sedimentation. *Geologie en Mijnbouw*, 73, S. 143–156, 1994.
- Van den Berg, M.W., Groenewoud, W., Lorenz, G.K., Lubbers, P.J., Brus, D.J., Kroonenberg, S.B.: Patterns and velocity of recent crustal movements in the Dutch part of the Roer Valley rift system. *Geologie en Mijnbouw*, 73, S. 157–167, 1994.
- Witte, B., Schmidt, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1989.
- Yielding, G., Roberts, A.M.: Footwall uplift during normal faulting – implications for structural geometries in the North Sea. In: Larsen, R.M. (Hrsg.): Structural and Tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology, Norwegian Petroleum Society, Special Publication 1, S. 289–304, Amsterdam, 1992.

## Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Winfried Klein | Dr.-Ing. Bernd Krickel |  
Dr.-Ing. Jens Riecken  
Bezirksregierung Köln, Dezernat 71 – Datenstandards, Raumbezug  
50606 Köln  
winfried.klein@bezreg-koeln.nrw.de  
bernd.krickel@bezreg-koeln.nrw.de  
jens.riecken@bezreg-koeln.nrw.de

Dr. Martin Salamon  
Fachbereich Integrierte geologische Landesaufnahme Bergland  
Geologischer Dienst NRW – Landesbetrieb –  
De-Greiff-Straße 195, 47803 Krefeld  
martin.salamon@gd.nrw.de