

Historische Nivellements aus Preußen und Baden und ihre Bedeutung für die Bestimmung von Vertikalbewegungen im Oberrheingrabengebiet

Thomas Fuhrmann, Karl Zippelt und Bernhard Heck

Zusammenfassung

Das Nivellement ist seit Beginn der klassischen Landesvermessung im 19. Jahrhundert bis heute eine geodätische Messmethode zur hochgenauen Höhenübertragung, sowohl kleinräumig als auch über Hunderte von Kilometern. Unter Verwendung von Nivellementdaten aus verschiedenen Messperioden können vertikale Oberflächenbewegungen aus den gemessenen Höhenunterschieden abgeleitet werden. Im Rahmen eines transnationalen Projektes wurden hierfür erstmals Daten aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz im Bereich des Oberrheingrabens gemeinsam ausgewertet. Da die Ableitung von Bewegungsraten genauer wird, wenn die Messungen einen großen Zeitraum überdecken, wurde die Verwendung von historischen Nivellements aus dem 19. Jahrhundert untersucht. Dieser Beitrag präsentiert die historischen Messungen des Königreichs Preußen und des Großherzogtums Baden im Untersuchungsgebiet im Kontext der Ableitung von vertikalen Bewegungsraten aus wiederholt durchgeführten Nivellements.

Summary

Since its beginning in the 19th century until today, levelling is one of the most precise geodetic measurement techniques for height transfer on small scales as well as over hundreds of kilometres. Using levelling data of several measurement epochs it is possible to derive vertical surface displacements. Within a transnational project, data from Germany, France and Switzerland in the Upper Rhine Graben area have been collected and analysed. As displacement rates get more accurate if the measurements cover a long period, the use of historical levellings from the 19th century has been investigated. This article presents the historical measurements carried out by the Kingdom of Prussia and the Grand Duchy of Baden in the area of investigation w. r. t. deriving vertical displacement rates from repeated levelling.

Schlüsselwörter: Nivellement, preußische Landesaufnahme, Vertikalbewegungen, Oberrheingraben

1 Einleitung

Ende des 19. Jahrhunderts wurde in Europa damit begonnen, großräumige Nivellementnetze anzulegen mit dem Ziel, Festpunktfelder für Höhen bereitzustellen (Heck 2003, S. 297 ff.). Durch eine regelmäßige Wiederholung der Messungen bleiben zum einen das Festpunktfeld und

die zugehörigen Punkthöhen aktuell, zum anderen können Bewegungen an den Nivellementpunkten nachgewiesen werden. Für die Auswertung von wiederholt gemessenen Nivellements im Oberrheingrabengebiet wurden am Geodätischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (GIK) Rohdaten (gemessene Höhenunterschiede) aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz gesammelt und aufbereitet, um daraus in einer konsistenten Gesamtausgleichung aller verfügbarer Messdaten vertikale Bewegungsraten ableiten zu können. Die verwendeten Daten und einige grundlegende Bemerkungen zum kinematischen Ausgleichungsansatz sind in Abschnitt 2 zusammengefasst. Um die kleinen, tektonisch bedingten Bewegungsraten im Oberrheingrabengebiet (< 1 mm/a) mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, spielt der zeitliche Abstand der Messungen eine große Rolle. Je weiter zwei Nivellementkampagnen zeitlich auseinander liegen, desto genauer kann daraus eine säkulare Bewegungsrate an den Nivellementpunkten bestimmt werden. Daher wurde für die Auswertung auch auf Nivellementdaten vom Ende des 19. Jahrhunderts zurückgegriffen, die von den Vermessungsabteilungen des Königreichs Preußen, des Großherzogtums Baden und von entsprechenden Institutionen in Frankreich und der Schweiz gemessen wurden. In Abschnitt 3 werden die historischen Nivellements insbesondere der preußischen und badischen Vermessungsabteilungen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit zur Bestimmung von Bewegungsraten diskutiert. Abschnitt 4 präsentiert die Ergebnisse der kinematischen Netzausgleichung auch im Hinblick auf die Genauigkeit der berechneten Vertikalbewegungen.

2 Datenlage und Datenauswertung

Abb. 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Nivellementdaten aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz und die jeweilige Ordnung der Messung. Für die Bestimmung von Bewegungsraten sind nur mehrfach gemessene Nivellementpunkte von Bedeutung. Das Netzbild in Abb. 1 ist bereits auf wiederholt gemessene Punkte reduziert, weshalb bei manchen Linienstücken eine gerade Verbindung zwischen räumlich entfernten Punkten besteht. Diese Linienstücke wurden nur einmal gemessen, da in früheren oder späteren Messungen ein anderer Verlauf der Linie gewählt wurde. Dies gilt für einige der historischen Nivellements und für die neueste Messepoche

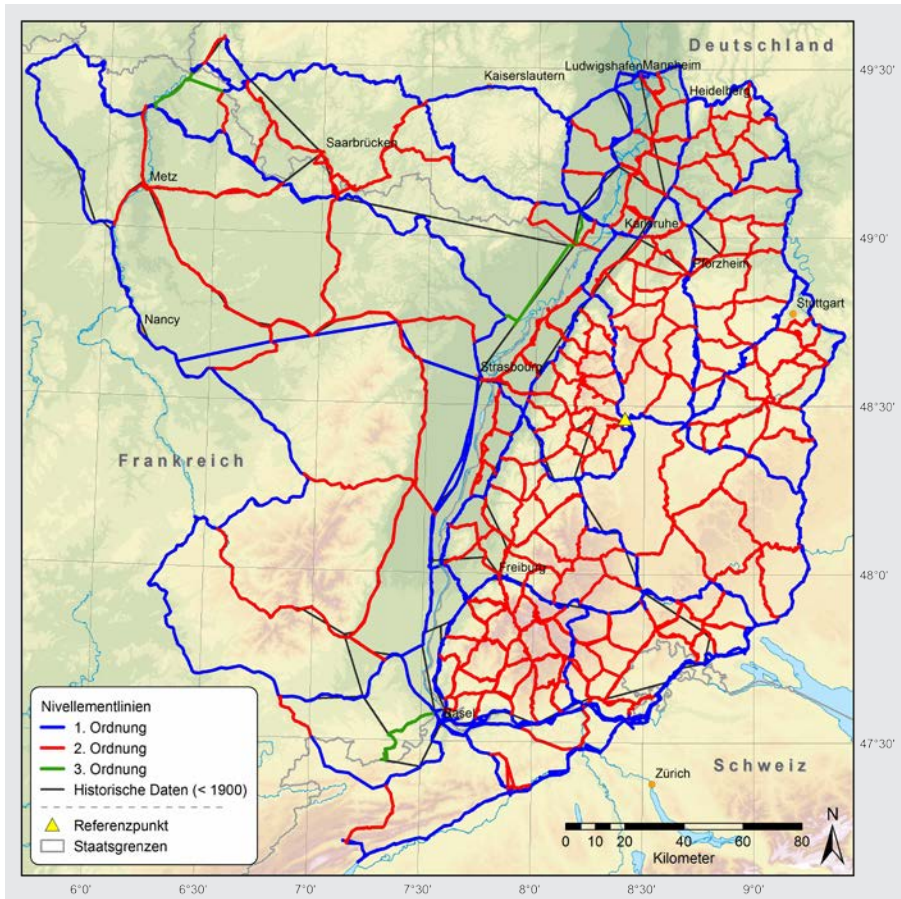


Abb. 1: Übersicht über die verwendeten Nivellementlinien im Bereich des Oberrheingrabens

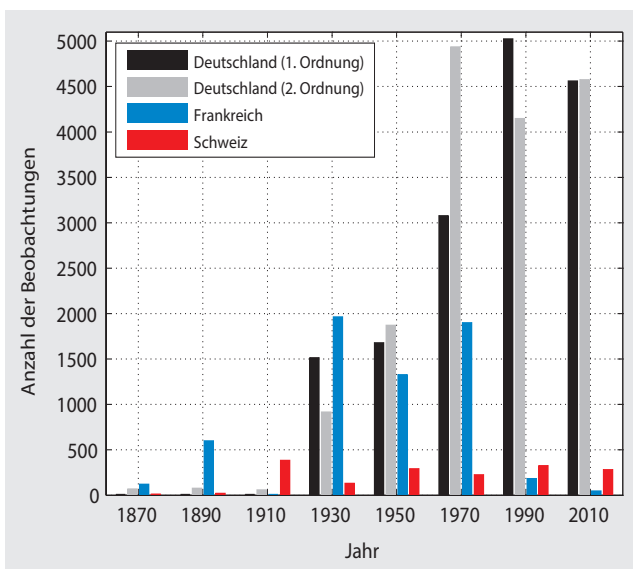


Abb. 2: Zeitliche Verteilung der gemessenen Höhenunterschiede

der französischen Landesvermessung, in der nicht mehr die komplette Nivellementschleife 1. Ordnung gemessen wurde, sondern eine sogenannte Traverse von Strasbourg über Nancy nach Brest in der Normandie. Generell ist zu beobachten, dass die Schleifen 1. Ordnung in Deutschland und der Schweiz kleinräumiger sind als in Frankreich, wo die Großschleife 1. Ordnung mit einer Länge von über

800 km das komplette Elsass und große Teile Lothringens abdeckt.

Betrachtet man die Zeitpunkte der in der Ausgleichung verwendeten Messungen, ergeben sich völlig unterschiedliche Verteilungen für die Daten aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz (Abb. 2). Während die auf Schweizer Landesgebiet gemessenen Höhenunterschiede zeitlich homogen verteilt sind, wurde der Großteil der französischen Nivellements zwischen 1920 und 1980 durchgeführt. Die letzte komplette Messung der französischen Großschleife 1. Ordnung erfolgte bereits im Jahr 1964. Die deutschen Messungen stammen hauptsächlich aus der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg mit der letzten Kampagne zur Erneuerung des DHHN aus den Jahren 2006 bis 2012. Während die deutschen Messkampagnen 1. Ordnung jeweils in einem möglichst kurzen Zeitabschnitt durchgeführt wurden, werden die Schweizer Nivellementlinien nach und nach erneuert (Schlatter 2007, S. 138).

Zur Verknüpfung der Nivellementnetze aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz sind Verbindungsmessungen an den Landesgrenzen von großer Bedeutung. Hierzu liefern die historischen Nivellements einen entscheidenden Beitrag, da Elsass und Lothringen vor dem Ersten Weltkrieg als Reichslande Teil des Deutschen Reiches waren und mehrere Messungen von der Landesaufnahme des Königreichs Preußen über die heutige deutsch-französische Staatsgrenze hinweg durchgeführt wurden.

Da die Daten aus drei verschiedenen Ländern stammen und zu völlig unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen wurden, ist eine reine Höhenausgleichung einzelner Messperioden oder eine mehrstufige Höhenausgleichung des gesamten Datenmaterials, wie von Halsig et al. (2013) beschrieben, zur Bestimmung von Bewegungsraten nicht zielführend. Daher wird, wie bereits von Ghitau (1970) vorgeschlagen, ein sogenannter kinematischer Ausgleichungsansatz verwendet, bei dem die Höhe eines Nivellementpunktes P_j zu einem beliebigen Zeitpunkt t_i mittels der Höhe $H_{0,j}$ zu einem Referenzzeitpunkt t_0 und dem Integral der Bewegung über die Zeit modelliert wird:

$$H_{i,j} = H_{0,j} + \int_{t_0}^{t_i} \alpha_j dt \quad (1)$$

$H_{i,j}$: Höhe des Nivellementpunktes P_j zum Zeitpunkt t_i ,
 $\alpha_j(t)$: Zeitvariable Vertikalbewegung des Punktes P_j .

Aus dieser Grundgleichung können verschiedene Bewegungsmodelle abgeleitet werden (Holdahl 1975, Vaníček and Christodoulidis 1974). Ein einfaches Modell approximiert das Integral in Gleichung (1) als Taylorreihenentwicklung und ergibt:

$$H_{i,j} \approx H_{0,j} + v_j \Delta t_i + \frac{1}{2!} a_j \Delta t_i^2 + \dots$$

$$\text{mit } \Delta t_i = t_i - t_0, \quad (2)$$

wobei v_j direkt als lineare Bewegungsrate eines Nivellementpunktes (Vertikalgeschwindigkeit zur Referenzperiode t_0) interpretiert werden kann. Terme höherer Ordnung in der Taylorreihenentwicklung repräsentieren nicht-lineare Bewegungen (a_j entspricht beispielsweise einer beschleunigten Punktbeziehung) und können bei Bedarf in der Ausgleichung mitgeschätzt werden. Die Ausgleichung erfolgt in einem Gauß-Markov-Modell mit den gemessenen Höhenunterschieden

$$h_{i,(j,k)} = H_{i,k} - H_{i,j} \quad (3)$$

als Beobachtungen und den Höhen, den linearen Bewegungsraten und optional Bewegungstermen höherer Ordnung als Parametern.

Wie ein reines Höhennetz hat auch ein kinematisches Netz einen Datumsdefekt. In Zippelt (1988) werden verschiedene Möglichkeiten der Datumsgebung diskutiert, wobei die Verwendung eines als stabil angenommenen Referenzpunktes für eine geodynamische Untersuchung am geeignetsten ist. Die Bewegungen sämtlicher ausgewerteter Nivellementpunkte beziehen sich dann auf den Referenzpunkt und werden nicht durch die Ausgleichung verzerrt. Als Referenzpunkt für das in Abb. 1 dargestellte Gesamtnetz wird ein an der evangelischen Stadtkirche in Freudenstadt vermarkter Nivellementpunkt verwendet, der in einer geologisch stabilen Region am Ostrand des Schwarzwaldes liegt. Als Knotenpunkt des Nivellementnetzes 1. Ordnung wurde er häufig angemessen (in den Jahren 1933, 1938, 1956, 1957, 1960, 1968, 1986, 1987 und 2007) und zeichnet sich durch eine zentrale Lage im ausgewerteten Netz aus. Das übliche stochastische Modell der Ausgleichung vernachlässigt mögliche Korrelationen zwischen den Beobachtungen und besteht aus einer Diagonalmatrix, die die gemessenen Höhenunterschiede im Wesentlichen streckenabhängig gewichtet. Da die Beobachtungen aus unterschiedlichen Zeiten und Ländern stammen und mit unterschiedlichen Standards gemessen wurden, wird zur besseren Abschätzung der Genauigkeit der Beobachtungen eine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt, die in Fuhrmann et al. (2014) ausführlich beschrieben wird.

3 Historische Nivellementdaten

Nahezu alle im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Nivellementdaten sind im Grunde genommen als »historisch« zu bezeichnen, da die Messung zum Zeitpunkt der Auswertung schon mehrere Jahre oder Jahrzehnte zurückliegt. Der Begriff »historisch« wird hier dennoch ausschließlich für Daten verwendet, die bereits im 19. Jahrhundert gemessen wurden, um die Besonderheit dieser Daten hervorzuheben, die zwei Weltkriege überlebt haben und zu einer Zeit gemessen wurden, in der Deutschland noch einen Kaiser hatte und Elsass-Lothringen Teil des Deutschen Reiches war. Abb. 3 zeigt die in diesem Projekt verwendeten Messungen aus dem 19. Jahrhundert und die beteiligten Institutionen vor dem Hintergrund der politischen Karte des Deutschen Reiches.

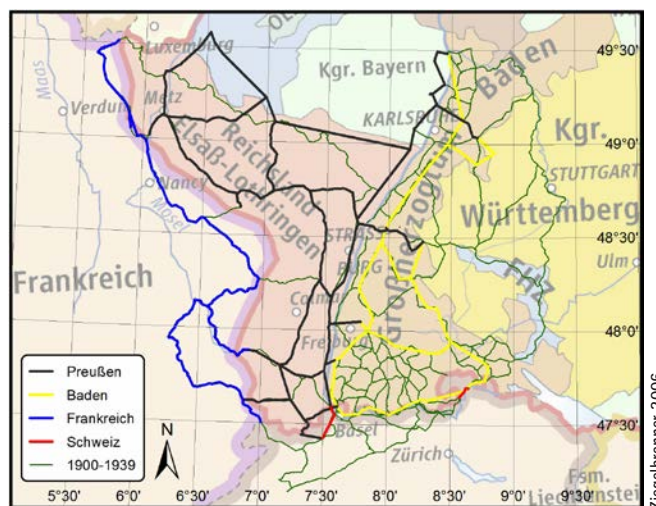


Abb. 3: Für die Gesamtauswertung verwendete Nivellementlinienstücke aus dem 19. und frühen 20. Jahrhundert; Hintergrund: Politische Karte des Deutschen Reiches (1871–1918)

Die mit »Preußen« gekennzeichneten Nivellementlinien wurden im Wesentlichen in den Jahren 1878 und 1881 von der »Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme« des Königreichs Preußen im damaligen Reichsland Elsass-Lothringen gemessen und sind in Preußen (1883) dokumentiert. Die Verbindungen zu den französischen Messungen sind in einem späteren Band (Preußen 1894) im Kapitel »Anschlüsse an die Nachbarstaaten« verzeichnet und wurden im Jahr 1891 gemessen. Die dargestellten badischen Messungen wurden von der »Grossherzoglichen Oberdirection des Wasser- und Strassenbaues« in den Jahren 1875 bis 1882 ausgeführt und sind in Baden (1885) dokumentiert. Einige dort verzeichnete Linienstücke wurden von der Vermessungsabteilung des Königreichs Württemberg übernommen bzw. gemeinsam mit preussischen Geometern nivelliert: »Zur sicheren Uebertragung des preussischen Horizontes von Elsass durch Baden bis Württemberg wurden im Jahr 1881 die zwei Linien Germersheim-Bretten und Strassburg-Alexanderschanze auf preussische Kosten je 4fach nivelliert, nämlich

1. und 2. durch die Beamten Mühlenthal und Kunkel der Preußischen Landesaufnahme, und 3. und 4. durch Professor [Wilhelm] Jordan« (Baden 1885, S. 2). Die französischen Messungen wurden unter der Direktion von Charles Lallemand zwischen 1891 und 1896 durchgeführt (Lallemand and Prévot 1927). Eine Verbindungsmessung zwischen französischen und preußischen Nivellements im Bereich der südlichen Vogesen (Cernay-Bussang) aus dem



Abb. 4: Südwestlicher Ausschnitt des preußischen Nivellementnetzes, aus Tafel III in Preußen (1894)

Jahr 1895 konnte aus Aufzeichnungen in Ermery (1960) rekonstruiert werden. Die preußische Verbindung von Metz an das französische Netz bei Novéant-sur-Moselle fehlt leider komplett. Die älteste verwendete Messung stammt aus dem »Nivellement de Précision de la Suisse«, durchgeführt von der Schweizerischen Geodätischen Kommission (Hirsch and Plantamour 1891) und gibt den Höhenunterschied zwischen Basel, Zentralbahnhof, und St. Louis, Kirche, an. Weitere hier verwendete Messungen aus dem Nivellement de Précision stammen aus dem Jahr 1881. Die erste Messepoche auf Schweizer Gebiet wurde komplett vor dem Zweiten Weltkrieg fertiggestellt (grüne Linien in Abb. 3), wobei der größte Teil davon bereits vor dem Ersten Weltkrieg gemessen wurde. Eine detaillierte Abhandlung zur Entwicklung des Schweizer Höhennetzes und zu verschiedenen Ausgleichungsansätzen für die Nivellementdaten befindet sich in Schlatter (2007).

Im Folgenden soll näher auf die preußischen und badischen Messungen eingegangen werden. Die preußischen Nivellements wurden im Rahmen der preußischen Landesaufnahme von 1868 bis 1894 durchgeführt und sind in acht Bänden mit dem Titel »Nivellements der Trigonomischen Abtheilung der Landesaufnahme« detailliert dokumentiert. Das gemessene Nivellementnetz umfasst das gesamte Deutsche Reich vom Elsass bis nach Ostpreußen mit Ausnahme von Baden, Württemberg, Bayern und Sachsen. Die Messungen wurden entlang von Schleifen mit Längen zwischen 113 und 731 km durchgeführt und anschließend anhand der Schleifenschlussfehler ausge-

glichen (siehe auch Torge 2009, S. 269 ff.). Obwohl keine Schwerekorrekturen an den gemessenen Höhenunterschieden angebracht wurden, liegen die Schleifenschlussfehler meist im Bereich von wenigen cm. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt einer Übersichtskarte aus Preußen (1894) für die südwestliche Region des preußischen Netzes. Bemerkenswert ist, dass der wissenschaftliche Austausch zwischen den verschiedenen Staaten offensichtlich gut funktionierte, besser als die politischen Beziehungen. Sämtliche gestrichelt dargestellten Linien kennzeichnen Messungen der Nachbarstaaten, zu denen die preußische Landesaufnahme Anschlussmessungen durchgeführt hat.

Für die Vermarkung der preußischen Nivellementpunkte wurden hauptsächlich Granitpfeiler mit integriertem Nummernbolzen verwendet, wie in Abb. 5 schematisch dargestellt. Die Nummerierung der Punkte ist fortlaufend,

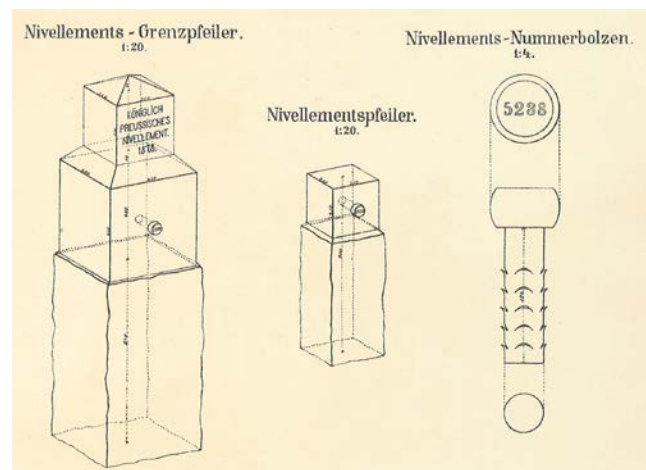


Abb. 5: Schematische Darstellung von Nivellementpfeilern und Nummernbolzen, aus Tafel VII in Preußen (1894)

mit bis zu vierstelligen Zahlen. Die Nummern einiger Knotenpunkte sind in Abb. 4 dargestellt, z.B. 5927 für einen Knotenpunkt in Saarbrücken.

Für geodynamische Untersuchungen sind historische Nivellementdaten nur dann von Interesse, wenn die gemessenen Nivellementpunkte auch in mindestens einer späteren Messung wiederverwendet wurden. Die meisten preußischen Messungen im Oberrheingrabengebiet wurden auf heutigem französischem Staatsgebiet durchgeführt. Tatsächlich sind einige der preußischen Punkte auch in späteren französischen Nivellements erneut gemessen worden. Sie werden in den Nivellementunterlagen des Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) mit der Bezeichnung »repère allemand« (deutscher Festpunkt) geführt, wobei in der Regel auch die preußische Nummer mit angegeben ist. Da Höhenfestpunktfelder einer ständigen Veränderung unterliegen, sind die meisten preußischen Pfeilerpunkte inzwischen verloren gegangen. Im Deutschen Haupthöhennetz beträgt die kontinuierliche Zerstörungsrate von Nivellementpunkten nach Jahn et al. (2011) ca. 3 bis 5 % pro Jahr. Zwei aktuell noch erhaltene preußische Pfeilerpunkte im südlichen Elsass sind in Abb. 6 dargestellt. Der preußische



Abb. 6: Preußische Nivellementpfeiler im heutigen Frankreich bei Kiffis (links) und in St. Louis (rechts)

Punkt 6533 liegt bei Kiffis an der Grenze zur Schweiz und hat im französischen Höhenfestpunktfeld die Bezeichnung S'.G.N303-31. Punkt 6511 liegt im Stadtgebiet von St. Louis und trägt die französische Bezeichnung A'.A.N3-3.

Die Pfeilerpunkte wurden von der preußischen Landesaufnahme wenn möglich in einem Abstand von exakt 2 km angebracht. Abb. 7 zeigt beispielhaft die in Preußen (1883) dokumentierten Messelemente von Linie 29 zwischen Saverne (Zabern, Punkt 6163) und Sarrebourg (Sarrburg, Punkt 6116). Alle Punkte, die zu den von Autorenseite markierten Punktnummern gehören, wurden in einer späteren, französischen Wiederholungsmessung der Linie aus dem Jahr 1937 erneut angemessen und konnten für die Bestimmung von Vertikalbewegungen verwendet werden. Auf anderen Linien sind deutlich weniger Punkte vorhanden, die wiederholt gemessen wurden, entweder weil die Vermarkung verloren ging oder weil die Linie im späteren französischen Netz einen anderen Verlauf hat (z.B. zwischen Strasbourg und Lauterbourg).

Neben den Granitpfeilern wurden von der preußischen Landesaufnahme insbesondere in städtischen Gebieten auch Mauerbolzen und Höhenmarken als Vermarkungstypen eingesetzt. Einige Punkte, die bereits im Rahmen der Europäischen Gradmessung (Torge 2009, S. 233 ff.) vermarktet wurden, sind in den preußischen Unterlagen ebenfalls wiederzufinden, z.B. eine Höhenmarke am Straßburger Münster.

Linie 29.			
6163	1,83	101,187	190
6162	2,00	119,925	925
6161	2,00	*63,096	096
6160	2,00	*76,594	589
6159	1,94	*87,297	288
6158	2,02	*84,927	920
6157	2,00	9,920	922
6156	2,00	*67,667	665
6155	2,00	5,651	642
6154	2,00	*81,993	990
6153	2,00	*66,616	615
6152	2,00	1,227	226
6151	1,62	6,848	848
6116			
	25,41	72,948	916

Beobachtet 1881 v. Mühlhausen.

Abb. 7: Linienverzeichnis der gemessenen Höhenunterschiede, aus Preußen (1883)

Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung der preußischen Daten für die Ableitung von Oberflächenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens sind die Messungen an heutigen Staatsgrenzen, insbesondere Rheinübergangsmessungen zwischen Deutschland und Frankreich. Preußische Messungen über den Rhein wurden bei Germersheim, Strasbourg, Breisach, Bantzenheim, Hunningue und Basel durchgeführt. Um diese Messungen optimal nutzen zu können, sollten die Linien, wenn möglich, auf der östlichen Seite des Rheins weitergeführt und die offenen Schleifen mit Messungen aus demselben Zeitraum geschlossen werden. Dazu wurden die in Abb. 3 dargestellten badischen Nivellements verwendet.

Die badischen Messungen wurden zwischen 1875 und 1882 durchgeführt und sind in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt. Im Gegensatz zu späteren Messungen in Südwestdeutschland folgten die von der »Großherzoglichen Oberdirection des Wasser- und Strassenbaues« gemessenen Nivellementlinien dem damaligen Eisenbahnnetz, weshalb hier weniger Punkte in späteren Epochen wiederholt gemessen wurden als im preußischen Netzteil. Die meisten mehrfach gemessenen Nivellementpunkte sind an Bahnhofsgebäuden als Höhenmarke mit Loch vermarktet (Abb. 8). Als Höhenbezugspunkt dient das Loch des Mes-

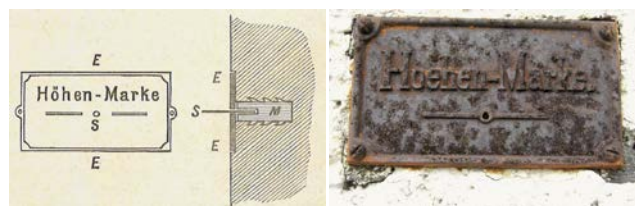


Abb. 8: Badische Höhenmarke schematisch (Fig. 1 aus Baden 1885) und an einem ehemaligen Bahnhof im Südschwarzwald

singbolzens M, wobei vor der Messung durch Einstecken eines Stiftes S untersucht werden soll, ob die Eisenplatte E noch in korrekter Position liegt (Baden 1885, S. 3).

Entlang der beiden »Straßenlinien« Germersheim–Bretten und Strasbourg–Alexanderschanze wurden die preußischen Granitpfeiler als Höhenfestpunkte verwendet. Der Granitpfeiler mit dem Nummernbolzen 6619 am Melanchthon-Denkmal in Bretten (Abb. 9) ist heute noch erhalten (amtliche Punktnummer 6918/16) und wurde zuletzt in der aktuellen Wiederholungsmessung des Deutschen Haupthöhennetzes im Jahr 2009 gemessen, 128 Jahre nach der gemeinsamen Messung von Kunkel und Jordan. In der Gesamtausgleichung wird für diesen Punkt eine mittlere Geschwindigkeit von 0,03 ($\pm 0,1$) mm/a relativ zum Referenzpunkt in Freudenstadt geschätzt. Dies belegt, dass die preußischen Pfeilerpunkte durchaus über einen langen Zeitraum hinweg stabil sein können.

Die Qualität der historischen Nivellementdaten wird im Folgenden anhand der Schleifenschlussfehler untersucht. In den badischen Unterlagen sind teilweise bis zu vier Messungen aus unterschiedlichen Jahren verzeichnet. Für die hier vorgestellte Auswertung wurden die Messungen



Abb. 9: Preußischer Granitpfeiler am Melancthon-Denkmal in Bretten

verwendet, die zeitlich am besten zu den preußischen Daten passen und zugleich die Schleifenschlussfehler minimieren. In Tab. 1 sind die Schleifenschlussfehler der historischen Nivellements und der späteren Messepochen für die in Abb. 1 dargestellten Schleifen zusammengestellt. In Deutschland wurden hierfür bis auf einige Linien im Saarland ausschließlich die Messungen entlang Linien 1. Ordnung verwendet. Die erste Messepoche der transnationalen Messungen besteht bis auf einige zwischen 1911 und 1922 gemessene Schweizer Linien ausschließlich aus Messungen vor 1900. Die dritte Messepoche der transnationalen Schleifenschlüsse kombiniert die französischen Messungen aus den Jahren 1964 und 1973 mit späteren Messungen aus Deutschland. Generell ist erkennbar, dass die Qualität der historischen Daten etwas schlechter ist als die der späteren Messungen, was sich durch das verwendete Instrumentarium, insbesondere die verwendeten Nivellierlatten, erklären lässt. Bis Anfang

Tab. 1: Mittlere Schleifenschlussfehler (SSF) in mm/ $\sqrt{\text{km}}$ für verschiedene Regionen und Messepochen

Region	Epoche	SSF	Anzahl der SSF
Deutschland	1876–1882	1,57	5
	1922–1939	0,65	10
	1950–1970	0,58	19
	1981–1987	0,55	16
	2003–2012	0,49	15
Frankreich	1878–1896	1,96	5
	1920–1957	1,46	8
	1964–1973	1,40	10
Schweiz	1906–1928	1,69	2
	1949–1997	0,08	2
	1978–2008	0,78	2
Transnational	1867–1922	1,44	9
	1954–1973	0,91	9
	1964–2012	0,63	8

des 20. Jahrhunderts kamen ausschließlich Holzlatten zum Einsatz. Das thermisch stabile Invar wurde in der Schweiz beispielsweise erstmalig 1913 eingesetzt (Schlatte 2007, S. 142). Im französischen Teil des Netzes sind die Schleifenschlussfehler größer als in Deutschland und der Schweiz, was u. a. daran liegt, dass hier viele Messungen entlang von Linien 2. Ordnung für die Berechnung der Schleifenschlussfehler verwendet wurden.

Obwohl die Qualität der historischen Daten nicht dieselbe Genauigkeitsstufe erreicht wie spätere Messungen, sind sie aus zwei Gründen dennoch von großer Bedeutung für die Bestimmung von Vertikalbewegungen. Zum einen verlängern sie die Zeitbasis, aus der die Messungen stammen, um mehrere Dekaden und ermöglichen dadurch eine höhere Genauigkeit der daraus abgeleiteten Bewegungen (die Genauigkeit einer Vertikalgeschwindigkeit ist proportional zum Kehrwert des Zeitunterschiedes der Messungen, siehe Gleichung (4)). Zum anderen enthalten die historischen Daten viele Messungen an der heutigen Staatsgrenze zwischen Deutschland und Frankreich, insbesondere über den Rhein. Während vor 1900 insgesamt neun über die heutige Staatsgrenze hinweg durchgeführte Messungen vorliegen, gibt es nach 1900 lediglich 13 weitere, transnationale Nivellements, bei denen die Zeitdifferenz der anliegenden Verbindungsmessungen innerhalb von fünf Jahren liegt.

4 Ergebnisse

Vor der Verwendung der Nivellementdaten in der kinematischen Ausgleichung müssen die Einzelmessungen in einer gemeinsamen Datenbasis zusammengeführt werden. Dazu wurde ein eigenes Datenbanksystem entwickelt, das die aus unterschiedlichen Quellen stammenden Datenformate einlesen und weiterverarbeiten kann (Zippelt and Dierks 2007). Da die historischen Daten und ein Großteil der französischen Messungen bisher nicht in digitaler Form vorlagen, waren aufwändige Digitalisierungsarbeiten notwendig. Nach dem Einlesen der Daten muss das Netz auf Punkte mit Anmessungen in mindestens zwei Messepochen reduziert werden, da nur an diesen Punkten eine vertikale Bewegungsrate geschätzt werden kann (siehe auch Fuhrmann and Zippelt 2013). In der kinematischen Ausgleichung werden in einem ersten Schritt nur lineare Bewegungen angenommen (vgl. Gleichung 2). An einigen Punkten lässt sich das Bewegungsverhalten nicht durch einen linearen Ansatz modellieren. Für solche Punkte mit nicht-linearer Bewegung muss eine der folgenden Optionen gewählt werden, wobei 2. und 3. insbesondere bei episodischen Bewegungen zur Anwendung kommen:

1. Schätzen eines zusätzlichen, beschleunigten Bewegungsterms,
2. Aufteilen der Punktbewegung in zwei Teilabschnitte,
3. Überbrücken der anliegenden Messungen einer Epoche.

Nach der Reduktion des Netzes auf mehrfach gemessene Punkte und der iterativen Optimierung des Datenmaterials (nicht-lineare Bewegungen, Test auf grobe Fehler, siehe Zippelt 1988) verbleiben noch 40.049 gemessene Höhenunterschiede zwischen 15.816 Nivellementpunkten (vgl. Abb. 2). Immerhin 841 Beobachtungen (mehr als 2 %) stammen aus historischen Nivellements (vor 1900) und leisten einen wichtigen Beitrag zur Schätzung der linearen Bewegungsraten. Obwohl die historischen Messungen in der Varianzkomponentenschätzung etwas größere Va-

rianzfaktoren als Messungen aus späteren Epochen erhalten (siehe Fuhrmann et al. 2014), hat ihre Verwendung einen positiven Effekt auf das Ausgleichungsergebnis. Die Genauigkeit der geschätzten Bewegungsraten an den Nivellementpunkten verhält sich umgekehrt proportional zum Zeitraum, aus dem die Messungen stammen:

$$\sigma_v \sim 1 / \Delta T. \quad (4)$$

Durch die Verwendung der historischen Nivellements kann an einigen Punkten ein Gesamtzeitraum ΔT von mehr als 100 Jahren abgedeckt werden. Da Punkte, die über eine lange Zeit hinweg existieren, in der Regel auch häufiger angemessen werden als andere Punkte, ist der Beitrag dieser Messungen zur Gesamtredundanz des Ausgleichungssystems an diesen Punkten höher. Tab. 2 zeigt hierzu einen Vergleich der historischen Punkte mit langen Messzeiträumen mit der Grundgesamtheit aller Punkte bzgl. der punktwisen Redundanzanteile (Summe der Redundanzanteile aller an einem Punkt anliegenden Beobachtungen) und der Standardabweichungen der Bewegungsraten. Daraus wird ersichtlich, dass Punkte, die über einen langen Zeitraum mehrfach gemessen wurden, sowohl einen relativ größeren Anteil an der Gesamtredundanz der Ausgleichung haben, als auch eine höhere Genauigkeit in der Bewegungsraten liefern.

Tab. 2: Auswirkung des Messzeitraums auf punktwise Redundanzanteile und Standardabweichung der Bewegungsraten

	Anzahl	MPR	MSTD
Historische Punkte, $\Delta T > 100$ Jahre	82	3,0	0,14 mm/a
Historische Punkte, $\Delta T > 90$ Jahre	120	2,4	0,18 mm/a
Historische Punkte, $\Delta T > 80$ Jahre	175	2,0	0,18 mm/a
Alle Punkte (ohne Referenzpunkt)	15815	1,1	0,20 mm/a

MPR: Mittlerer punktwiser Redundanzanteil

MSTD: Mittlere Standardabweichung

Abb. 10 visualisiert die geschätzten Vertikalgeschwindigkeiten von 14.098 Nivellementpunkten (nach Filterung von Punkten mit extremen Bewegungsraten) durch farbige Balken für Hebung und Senkung relativ zum Referenzpunkt des Netzes in Freudenstadt. Neben einigen anthropogenen Effekten (Bergbaugebiete, Erdölförderung bei Landau, Grundwassernutzung im Raum Mannheim/Ludwigshafen) sind auch tektonisch bedingte Oberflächenbewegungen sichtbar. Der Oberrhein Graben zeigt generelle Senkungstendenzen, während die Grabenschultern (Schwarzwald, Vogesen, Pfälzer Wald) leichte Hebungen aufweisen. Generell nimmt die Genauigkeit der Bewegungsraten ab, je weiter ein Nivellementpunkt vom Referenzpunkt entfernt ist. Im Mittel liegt die Standardabweichung der dargestellten Bewegungsraten bei 0,18 mm/a (90 % < 0,3 mm/a), wobei die Genauigkeit im französischen Netzteil schlechter ist als im deutschen und Schweizer Teil (mittlere Standardabweichung im franzö-

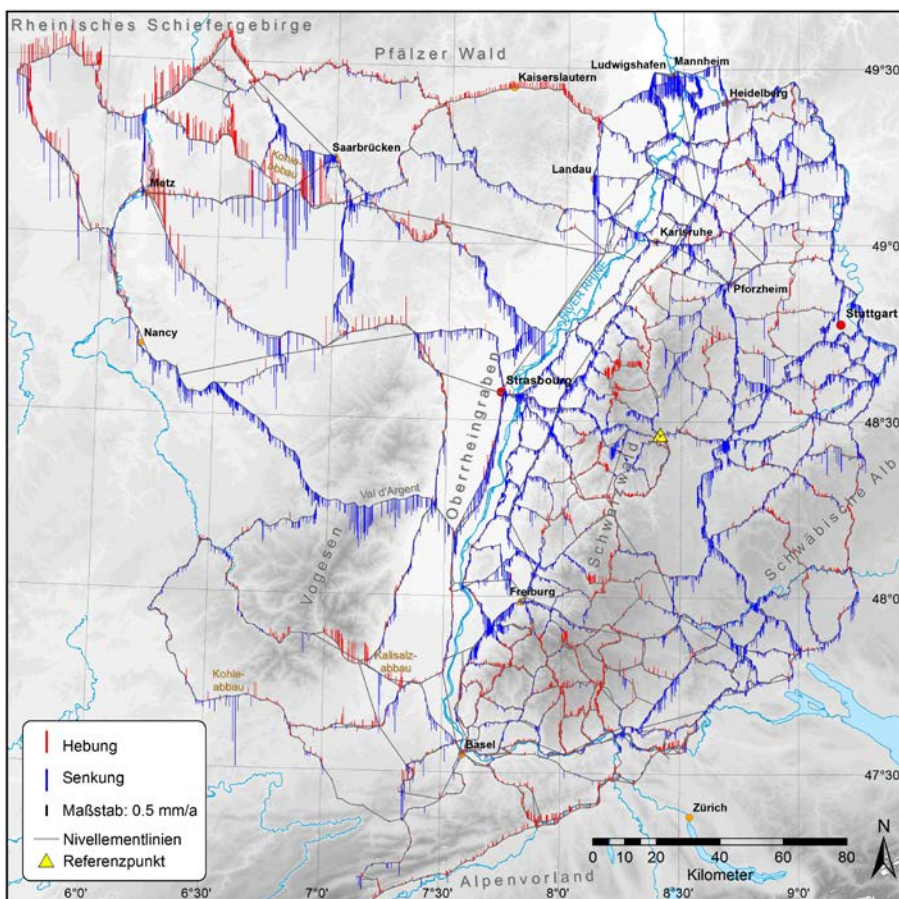


Abb. 10: Vertikalgeschwindigkeiten aus der kinematischen Ausgleichung von wiederholt gemessenen Präzisionsnivellements im Oberrhein Grabengebiet

sischen Teil schlechter ist als im deutschen und Schweizer Teil (mittlere Standardabweichung im franzö-

sischen Teil: 0,34 mm/a gegenüber 0,15 mm/a im deutschen und Schweizer Teil). Die großen Bewegungsraten im Nordwesten des Netzes haben Standardabweichungen größer als 0,3 mm/a und überschätzen sehr wahrscheinlich die tatsächlich auftretenden Bodenbewegungen. Insbesondere östlich des Rheins liefert die vorliegende Analyse einen Einblick in die dort auftretenden Oberflächenbewegungen mit bisher unerreichter räumlicher Auflösung und Genauigkeit.

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Auswertung von wiederholt gemessenen Präzisionsnivellements vorgestellt, die im Rahmen des DFG-Projektes »Vertikale Krustenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens aus der Analyse von Wiederholungsnivellements, SAR-Interferometrie und GNSS« durchgeführt wurde. Die verwendeten Nivellementdaten wurden dankenswerterweise von den Vermessungsverwaltungen aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden historische Nivellements aus dem späten 19. Jahrhundert digitalisiert und in die Auswertung integriert. Insbesondere im Elsass und in Lothringen leisten diese Daten einen entscheidenden Beitrag zur Gesamtauswertung. Erstens wird die zeitliche Abdeckung der Beobachtungen verlängert, was zu einer genaueren Schätzung der Bewegungsraten beiträgt. Zweitens enthält das historische Datenmaterial viele Messungen über heutige Staatsgrenzen hinweg, da Elsass-Lothringen zum Zeitpunkt der Messungen Teil des Deutschen Reiches war. Die Qualität der historischen Daten erreicht zwar nicht ganz das Niveau der späteren Nivellements, ist aber dennoch beachtlich, wenn man bedenkt, mit welchem Instrumentarium die Messungen durchgeführt wurden (z.B. Holzlatten anstatt Präzisionslatten mit Invarband).

Die Gesamtausgleichung der verfügbaren Daten resultiert in einer detaillierten Karte rezenter Höhenänderungen, die wichtige Erkenntnisse für weitere geowissenschaftliche Untersuchungen des tektonisch aktiven Oberrheingrabengebietes liefert. Ein weiteres, geodynamisches Projekt am GIK analysiert derzeit ein Netz permanenter GNSS-Stationen im Oberrheingrabengebiet (u.a. SAPOS®-Stationen), um aus den Koordinatenzeitreihen der Stationen großräumig horizontale und vertikale Oberflächenbewegungen abzuleiten (Knöpfler et al. 2009). Erste Ergebnisse der GNSS-Analysen und eine Gegenüberstellung mit vertikalen Bewegungsraten aus der Nivellementauswertung sind in Fuhrmann et al. (2013a) publiziert. Zusätzlich werden am GIK C-Band-Radaraufnahmen der Satelliten ERS-1/2 und Envisat mittels SAR-Interferometrie entlang des kompletten Oberrheingrabens ausgewertet, um daraus Bewegungsraten an Oberflächenpunkten abzuleiten (Fuhrmann et al. 2013b). Die Ergebnisse aller drei Techniken (Nivellement, GNSS und SAR-Interferometrie) sollen schließlich verglichen und

zu einem 3D-Bewegungsfeld fusioniert werden, wie es in Cuenca et al. (2012) für Oberflächendeformationen in den Niederlanden vorgestellt wurde.

Widmung und Dank

Dieser Beitrag ist Prof. Dr.-Ing. Hermann Mälzer in Würdigung seiner bahnbrechenden, in den 1960er Jahren begonnenen Arbeiten zur Ableitung rezenter Bewegungen der Erdkruste aus Wiederholungsnivellements gewidmet. Die Autoren bedanken sich bei den folgenden Vermessungsverwaltungen für die kostenfreie Bereitstellung von Nivellementdaten: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL, Germany); Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo, Germany); Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung Saarland (LVGL, Germany); Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN, France); Bundesamt für Landestopografie swisstopo (Switzerland). Das Projekt wurde gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer HE 1433/17-1. Ein herzlicher Dank gebührt den Reviewern für das positive Feedback und die konstruktiven Anmerkungen.

Literatur

- Baden: Die Grossh. Badischen Haupt-Nivellements mit den Anschlüssen an die Nachbarstaaten. Braun, Karlsruhe, 1885.
- Cuenca, M. C., Hanssen, R., Hooper, A., Arian, M.: Surface Deformation of the Whole Netherlands After PSI Analysis. In: Proceedings of Fringe 2011 ESA Workshop, SP-697, 2012.
- Ermetry, H.: Correspondance entre les nivellements de base français et prussien en Alsace et en Lorraine et son interpretation géologique. Dissertation, Universität Strasbourg, 1960.
- Fuhrmann, T., Heck, B., Knöpfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Westerhaus, M., Zippelt, K.: Recent surface displacements in the Upper Rhine Graben – Preliminary results from geodetic networks. *Tectonophysics* 602(0), S. 300–315, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.10.012>, 2013a.
- Fuhrmann, T., Knöpfler, A., Mayer, M., Schenk, A., Westerhaus, M., Zippelt, K., Heck, B.: Towards a Fusion of SAR-Interferometry, GNSS and Precise Levelling in the Upper Rhine Graben Area, Southwest Germany. In: Ouwehand, L. (ed), Proceedings of ESA Living Planet Symposium, SP-722, 2013b.
- Fuhrmann, T., Zippelt, K.: Berechnung und Beurteilung rezenter vertikaler Oberflächenbewegungen abgeleitet aus wiederholten Präzisionsnivellements in den Regionen Nordschweiz und Südwestdeutschland. Nagra Arbeitsbericht NAB 12–33, Nagra, Wettingen, 2013.
- Fuhrmann, T., Westerhaus, M., Zippelt, K., Heck, B.: Vertical displacement rates in the Upper Rhine Graben area derived from precise leveling. *Journal of Geodesy*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-014-0721-0>, 2014.
- Ghitau, D.: Modellbildung und Rechenpraxis bei der nivellistischen Bestimmung säkularer Landhebungen. Dissertation, Universität Bonn, 1970.
- Halsig, S., Ernst A., Schuh, W.-D.: Ausgleichung von Höhennetzen aus mehreren Epochen unter Berücksichtigung von Bodenbewegungen. *zfv* 4/2013, S. 288–296, 2013.
- Heck, B.: Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung. Wichmann, Heidelberg, 2003.
- Hirsch, A., Plantamour, E.: Nivellement de precision de la Suisse exécuté par la Commission Géodésique Fédérale, Band 9. Georg, Genève, 1891.

- Holdahl, S.: Models and strategies for computing vertical crustal movements in the United States. Presentation at the International Symposium on Recent Crustal Movements, Grenoble, 1975.
- Jahn, C.H., Feldmann-Westendorff, U., Grüner, D., Kulle, U., Lembrecht, P.: Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes in Niedersachsen (als Teil des bundeseinheitlichen, homogenen und integrierten Festpunktfeldes). Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung (NaVKV) 4/2011, S. 3–26, 2011.
- Knöpfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Heck, B.: GURN (GNSS Upper Rhine Graben Network) Status and First Results. 95th Journées Luxembourgeoises de Géodynamique, extended abstracts, Echternach, Luxemburg, 2009.
- Lallemand, C., Prévot, E.: Le nivellement général de la France de 1878 à 1927. Imprimerie nationale, France, 1927.
- Preußen: Nivellement im südwestlichen Theile des preußischen Staates und im Reichsland Elsaß-Lothringen, Nivellements der Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme, Band 5. Königliche Hof-Buchhandlung von E. S. Mittler & Sohn, 1883.
- Preußen: Ost- und Westpreußen, Nivellements der Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme, Band 8. Königliche Hof-Buchhandlung von E. S. Mittler & Sohn, 1894.
- Schlatter, A.: Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Volume 72, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, 2007.
- Torge, W.: Geschichte der Geodäsie in Deutschland. de Gruyter, Berlin, 2009.
- Vaniček, P., Christodulidis, D.: A Method for the Evaluation of Vertical Crustal Movement from Scattered Geodetic Relevelings. Canadian Journal of Earth Sciences 11(5), S. 605–610, 1974.
- Ziegelbrenner: Own work/Source of Information: Putzger – Historischer Weltatlas, 89. Auflage, 1965; Westermanns Großer Atlas zur Weltgeschichte, 1969; Haacks geographischer Atlas. VEB Hermann Haack Geographisch-Kartographische Anstalt, Gotha/Leipzig, 1. Auflage, 1979; dtv-Atlas zur Weltgeschichte Band 1: Von den Anfängen bis zur Französischen Revolution; 23. Aufl. 1989, ISBN 3-423-03002-X, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutsches_Reich1.png, letzter Zugriff 6/2014, Erstelldatum: 2006.
- Zippelt, K.: Modellbildung, Berechnungsstrategie und Beurteilung von Vertikalbewegungen unter Verwendung von Präzisionsnivellements. DGK Reihe C, Heft Nr. 343, München, 1988.
- Zippelt, K., Dierks, O.: Auswertung von wiederholten Präzisionsnivellements im südlichen Schwarzwald, Bodenseeraum sowie in angrenzenden schweizerischen Landesteilen. Nagra Arbeitsbericht NAB 07–27, Nagra, Wettingen, 2007.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Thomas Fuhrmann
Dr.-Ing. Karl Zippelt
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Bernhard Heck
Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
fuhrmann@kit.edu, Tel.: +49 (0)721 608 43667
karl.zippelt@kit.edu
bernhard.heck@kit.edu

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.