

Bergbaubedingte Höhenänderungen im Ruhrgebiet – Eine Analyse auf Basis digitalisierter historischer Karten

Stefan Harnischmacher und Harald Zepp

Zusammenfassung

Auf Basis einer Digitalisierung sämtlicher Höhenlinien und -punkte in Karten der Preußischen Landesaufnahme aus dem Jahr 1892 und ihres Vergleichs mit aktuellen digitalen Geländemodellen konnten mithilfe eines Geographischen Informationssystems erstmals flächendeckend, großmaßstäbig und systematisch bergbaubedingte Höhenänderungen im Ruhrgebiet detektiert und visualisiert werden. Mit Beträgen von bis zu -25 m sind die größten Senkungen im Bereich der zentralen Emscherniederung festzustellen. Für das gesamte Untersuchungsgebiet von 2.700 km^2 resultiert eine Nettohöhendifferenz von $-1,6\text{ m}$.

Summary

Elevation data on historical maps from 1892 was digitised and interpolated with the help of a Geographic Information System, in order to intersect the historical surface with a current Digital Elevation Model and finally detect area-wide differences in elevation due to coal mining. As a result, the highest values of subsidence, amounting to more than -25 m , were observed within the central Emscher floodplain. The net difference in elevation of the total area under investigation (approximately $2,700\text{ km}^2$) amounts to 1.6 m .

1 Problemstellung und Zielsetzung

Großflächige Absenkungen der Geländeoberfläche als Folge der unterirdischen Gewinnung von Steinkohle im sog. Tiefbau führten im Jahr 1855 zu ersten Klagen über Bergschäden im Essener Raum und betrafen die Austrocknung von Brunnen. Im Jahr 1868 waren bereits 1000 Gebäude und auch Fabrikanlagen im Bereich der Krupp'schen Gussstahlfabrik reparaturbedürftig. Zunächst fehlten wissenschaftlich fundierte Kenntnisse über die Geländeabsenkungen und ihre Folgen, bis u. a. Eisenbahngesellschaften ab 1860 mit umfangreichen Höhenmessungen begannen. Nachdem sich auch Haus- und Grundbesitzer anschlossen, war Anfang der 1880er-Jahre ein Großteil des Ruhrgebiets vermessen. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Senkungen im Emscherraum zwischen Herne und Gelsenkirchen bereits eine Tiefe von bis zu fünf Metern erreicht hatten (Bleidick 1999).

Während die Folgen der Bergsenkungen für Gebäude, Fabrikanlagen, Verkehrswege und Versorgungsleitungen grundsätzlich reparabel waren, erfuhren die Vorflutverhältnisse im Einzugsgebiet der Emscher eine irreversible Veränderung, als der Bergbau ab Mitte des 19. Jahrhunderts die Emscherzone erreichte (Steinberg 1988). Es

entstanden Senkungssümpfe, die den Abfluss der zudem stark verunreinigten Emscher und ihrer Nebengewässer behinderten und im Extremfall sogar eine Umkehr des Gefälles verursachten (Peters 1999). Nachdem zunehmend Krankheiten und Seuchen als Folge der Überflutungen auftraten, kam es im Jahr 1899 zur Gründung der Emschergenossenschaft, deren Aufgabe ab 1904 der technische Ausbau des Gewässersystems zu Abwassersammlern war (Held und Herget 2005). Es entstanden offene Abwasserkanäle oder Verrohrungen, die eine schnelle und störungsfreie Ableitung der Abwässer im bergsenkungsbeeinflussten Emschereinzugsgebiet gewährleisten sollten (Peters 1999, Rathke 1993). Begleitend zu derartigen Wasserbaumaßnahmen wurde die künstliche Entwässerung der Senkungsgebiete durch Pumpwerke erforderlich. Insgesamt werden heute von Emschergenossenschaft und Lippeverband mehr als 200 Pumpwerke betrieben, die 38% des Emschergenossenschafts- und 15% des Lippeverbandsgebietes künstlich entwässern und jährlich 608 Millionen Kubikmeter Wasser pumpen (Emschergenossenschaft & Lippeverband 2008).

Die Ursachen großflächiger Bergsenkungen sind beim Tiefbau im Gewinnungsverfahren des sog. Langfrontbaus zu suchen, bei dem zwischen zwei parallel angeordneten Strecken entlang des etwa 250 bis 350 m langen Strebs Steinkohle in bis zu 1500 m Tiefe aus dem Flöz gewonnen und an die Tagesoberfläche befördert wird. Der Hohlraum im Streb wird durch einen sog. Schreitausbau temporär offengehalten, bis sich dieser in Abbaurichtung fortbewegt und hinter dem Streb die darüberliegenden Gesteinsschichten in den ausgekohlten Hohlraum einbrechen (Pollmann und Wilke 1994). Das Volumendefizit paust sich anschließend bis zur Tagesoberfläche als flache Senkungsmulde durch (Szelag und Weber 1993). Der maximale Senkungsbetrag macht verschiedenen Quellen zufolge etwa 90 bis 95% der ursprünglichen Flözmächtigkeit aus (Kratzsch 2008, Pollmann und Wilke 1994, Whittaker und Reddish 1989). Die Fläche der Senkungsmulde ist zumeist größer als die Abbaufäche des Gewinnungsbetriebes im Untergrund, sodass der Rand der Senkungsmulde je nach Lagerung des Flözes und der Ausbildung des Deckgebirges mehr oder weniger weit außerhalb der Abbaukanten liegt (Bell und Donnelly 2006, Szelag und Weber 1993).

Bei Durchsicht zugänglicher Quellen zu den beobachteten Ausmaßen von Bergsenkungen im Ruhrgebiet sind lediglich vereinzelte Angaben über maximale oder mittlere Senkungsbeträge in unterschiedlichen Raumausschnitten zu finden. So heißt es etwa bei Meyer (1986, S. 185): »Im Ruhrrevier sind weite Gebiete um mehr als 10 m abgesun-

ken, in Essen-Stoppenberg über 14 m, bei Dortmund-Deusen sogar bis zu 24 m«. An anderer Stelle beschreibt Meyer (2002, S. 21) Absenkungsbeträge »[...], die im Ruhrrevier von mehreren Metern (in den älteren, vor allem südlich der Ruhr gelegenen Abbaugebieten) bis zu über 20 Metern (maximal 24 Metern!) in den Kernzonen zwischen Ruhr und Lippe schwanken«. Denselben Maximalbetrag von 24 Metern nennen auch Bell et al. (2000) sowie Held und Herget (2005, S. 12) (»Die größten Absenkungen der Geländeoberfläche um bis zu 24 m fanden im Norden Dortmunds statt.«). Darüber hinaus sind keine Angaben zur genauen Lage von Bergsenkungsgebieten oder gar großmaßstäbige Verbreitungskarten zu finden. Lediglich Rhein (2008) präsentiert erstmals eine kleinmaßstäbige Karte des Emschergerossenschafts- und Lippeverbandsgebietes, in der die Verbreitung von Bergsenkungsgebieten dargestellt ist. Insgesamt fehlt eine großmaßstäbige und flächendeckende Übersicht der bergbaubedingten Höhenänderungen im Ruhrgebiet, deren Daten auf einer belastbaren und reproduzierbaren Methode beruhen. Aufgrund dieses Mangels kam in Kooperation mit der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 (ehemaliges Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen), die Idee auf, die frühesten erfassten und veröffentlichten Höheninformationen der Preußischen Landesaufnahme zu nutzen, um sie mit den aktuellen Geländehöhen zu vergleichen. Zielsetzung ist eine systematische und digitale Erfassung der historischen Höhen mithilfe eines Geographischen Informationssystems und ihre Verschneidung mit aktuell verfügbaren Digitalen Geländemodellen, sodass am Ende des Projektes erstmals für das gesamte Ruhrgebiet Daten zu bergbaubedingten Höhenänderungen im großen Maßstab vorliegen sollen. In den folgenden Kapiteln werden zunächst die angedeutete Methodik und die verwendeten Daten näher beschrieben, bevor anschließend ausgewählte Ergebnisse im Vordergrund stehen. Eine kritische Diskussion der Ergebnisse sowie das Fazit rücken am Ende des Beitrags u. a. die Eignung der beschriebenen Methode in den Vordergrund.

2 Material und Methoden

Die im Jahr 1875 begründete Preußische Landesaufnahme (auch als neue Landesaufnahme bezeichnet) verdankt ihren Ursprung der Reichsgründung im Jahr 1871, von der zahlreiche Impulse für eine systematische und flächendeckende Landesaufnahme ausgingen. So ging man nicht nur auf das Längenmaß Meter über, auch der Normalnullpunkt wurde für eine einheitliche Höhenangabe eingeführt und am Amsterdamer Pegel abgeleitet. In Preußen entschied man sich daher für eine neue, einheitliche topographische Aufnahme der Messtischblätter im Maßstab 1 : 25.000, die auf einer Neutriangulation des gesamten Staatsgebietes basierte (Krauss 1969). Bereits im Jahr 1846 entschloss sich die Preußische Landesauf-

nahme, das Gelände künftig durch Höhenlinien darzustellen. Die technischen Voraussetzungen wurden durch Einführung der sog. Kippregel geschaffen, mit deren Hilfe Höhen durch äquidistante Höhenlinien einfacher aufzunehmen, nachvollziehbar darzustellen waren und Geländeformen richtig erfasst werden konnten (Krauss 1969). Damit bilden die Blätter der Preußischen Landesaufnahme erstmals flächendeckend Höhenlinien und -punkte für das gesamte damalige Staatsgebiet ab.

Zur Beurteilung der Eignung von Kartenblättern der Preußischen Landesaufnahme als Informationsquelle für Geländehöhen ist ein genauer Blick auf die Entstehung der Höhenlinien und -punkte erforderlich. Grundlage der Messtischblattaufnahme im Gelände war eine Bestimmung von Lagefestpunkten durch Triangulation in drei zeitlich getrennten Ordnungen. Neben einer Bestimmung von Lagekoordinaten wurden aus den trigonometrischen Messungen die Höhen aller Punkte über NN mit einem Genauigkeitsgrad von einigen Dezimetern berechnet. Als Grundlage der Höhenbestimmungen auf den Messtischblättern der Preußischen Landesaufnahme diente ein Netz von Höhenfestpunkten, die durch Nivellements entlang von Nivellementsstrecken in einem Abstand von etwa 2 km dauerhaft vermarkiert wurden. Der Höhenunterschied zwischen zwei Festpunkten konnte bis auf Bruchteile von Millimetern eingemessen werden (Reichsamt für Landesaufnahme 1931). Auf den Messtischblättern der Preußischen Landesaufnahme sind die an den Hauptstraßen stehenden Nivellementsunkte mit einer Höhenzahl dargestellt, Festpunkte an Gebäuden sind aus Platzgründen nicht abgebildet.

Die Messtischblätter der Preußischen Landesaufnahme wurden unmittelbar aus den Ergebnissen topographischer Vermessungen kartiert. Das dominierende Vermessungsverfahren war die sog. Messtischaufnahme, bei der ein Topograph einen Messtisch und das frei darauf stehende Messinstrument, die Kippregel, für die örtliche Aufnahme einsetzte. Auf dem Messtisch war ein Zeichenkarton befestigt, auf dem zuvor der Kartenrahmen, das Gradnetz und etwa 25 Trigonometrische Punkte entsprechend ihrer Lage im Gradnetz eingetragen waren (Grothenn 1994, Meyer 1930). Nach Aufstellung des Messtisches an einem besonders freien Punkt stellt der Topograph mithilfe der Kippregel auf Grundlage der trigonometrischen Punkte, deren Höhe bekannt ist, zunächst seinen Standpunkt auf dem Zeichenpapier fest und berechnet seine dortige Bodenhöhe. Von einem einzelnen Standpunkt aus wurden sodann im Umkreis von etwa 400 bis 500 m alle Kleinmessungen durchgeführt, die zur Erfassung der topographischen Objekte und des Reliefs erforderlich waren (Reichsamt für Landesaufnahme 1931). Der Vermessungshelfer positionierte hierzu die Messlatte an den entsprechenden Punkt, der nach Lage und Bodenhöhe mit dem Fernrohr der Kippregel vom Messtisch aus eingemessen und unmittelbar mit dem Zirkel im Maßstab 1 : 25.000 in der jeweiligen Richtung und Entfernung vom Standpunkt am Kippregel-Lineal eingestochen wurde. Auf dem Zei-

chenpapier entstand so ein dichtes Netz von Zirkelstichen, an denen jeweils eine Höhenzahl vermerkt wurde. Zur Vermessung der gesamten Topographie mussten je nach Gelände 10.000 bis 50.000 Geländepunkte pro Kartenblatt aufgenommen werden (Grothenn 1994). Anschließend ging der Topograph samt Messtisch von Messpunkt zu Messpunkt und trug jeweils alle sichtbaren Gegenstände des Grundrisses sowie die Höhenlinien »[...] mit hartem, scharfen Bleistift [...]« (Reichsamt für Landesaufnahme 1931, S. 19) auf dem Zeichenpapier ein.

Zur Erfassung des Reliefs wurden durch Einzelpunkte die Wölbungslinien, also Rücken- und Muldenlinien (das sog. »Geripp«) eingemessen und eingezeichnet, bevor die Schnittpunkte solcher Höhenlinien mit den Wölbungslinien angedeutet wurden, die möglichst nahe weiterer, mit der Kippregel aufgenommener Höhenpunkte verliefen. Danach wurden entlang der Wölbungslinien unter Berücksichtigung des jeweiligen Böschungsgrades die Einteilungsstriche zusätzlicher Höhenlinien eingetragen und schließlich zu Höhenlinien verbunden. Hierbei standen dem Topographen Höhenlinien mit 5 m, 10 m und 20 m sowie Hilfhöhenlinien von 2,5 m und 1,25 m Höhenunterschied zur Verfügung (Reichsamt für Landesaufnahme 1931). Dass für diese Aufgabe ein geschulter Blick erforderlich war, belegt die folgende Empfehlung: »Geologisch-morphologische Vorbildung der Aufnehmer hat sich als notwendig erwiesen« (Reichsamt für Landesaufnahme 1931, S. 20). Die Genauigkeit der Höhenlinien hängt entscheidend von der Anzahl und Verteilung der mit der Kippregel eingemessenen Höhenpunkte ab. Insbesondere die Identifizierung des »Geripps«, also der Wölbungslinien und ähnlich markanter Geländeformen, sowie eine möglichst geschickte Anordnung von Messpunkten entlang des Geripps bestimmt die Qualität der Geländedarstellung. Die Anzahl der Messpunkte für die Höhendarstellung lag je nach Gelände etwa zwischen 80 bis 400 pro Quadratkilometer (Kost 1937).

Zur Abschätzung der Genauigkeit der Höhenlinien können die Fehlergrenzen eingemessener Höhenpunkte herangezogen werden: Die Fehlergrenze der durch Nivellements bestimmten trigonometrischen Punkte und Höhenfestpunkte beträgt nur Bruchteile von Millimetern (s. o.). Die hierauf aufbauenden, mit der Kippregel eingemessenen Höhenpunkte zeigen bereits Ungenauigkeiten von mehreren Dezimetern. Beide Fehler übertragen sich schließlich sowohl nach der Lage als auch Höhe auf die Höhenliniendarstellung (Kost 1937). Basierend auf Vermessungen in Baden-Württemberg kann nach Kost (1937) der Höhenfehler F_h [m] einer Höhenlinie in Abhängigkeit von der Geländeneigung α [Grad] wie folgt abgeschätzt werden:

$$F_h = \pm(0,8 + 15 \tan \alpha) \quad (1)$$

Der Lagefehler F_l [m] beträgt entsprechend (Kost 1937):

$$F_l = \pm(0,8 \cdot \cot \alpha + 15) \quad (2)$$

Aus diesen empirisch gewonnen Gesetzmäßigkeiten wird ersichtlich, dass die Lagegenauigkeit einer Höhenlinie mit abnehmender Geländeneigung sinkt, während die Höhengenaugigkeit steigt.

Die beschriebenen Messtischblätter der Preußischen Landesaufnahme bildeten die Basis zur digitalen Erfassung sämtlicher Höhenlinien und -punkte. Insgesamt wurden 21 Kartenblätter der Preußischen Landesaufnahme verwendet, die einen Großteil des Regionalverbandes Ruhrgebiet abdecken und im Jahr 1892 entstanden sind. Sie wurden vom ehemaligen Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen als Bilddateien im TIF-Format bereitgestellt und anschließend im Geographischen Informationssystem »ArcGIS« auf Basis von Gauß-Krüger-Koordinaten georeferenziert. Als Passpunkte dienten neben den vier Blattecken mindestens zwei weitere markante Geländepunkte wie etwa Trigonometrische Punkte an Kirchen, deren Lage bis heute unverändert blieb. Es wurde darauf geachtet, dass die zusätzlichen Passpunkte möglichst gut über das Kartenblatt verteilt waren. Damit wurde neben einer Polynomtransformation erster Ordnung (sog. affine Transformation) auch eine Polynomtransformation zweiter Ordnung möglich, bei der einzelne Bereiche des Bildes unterschiedlich stark gedreht, gestreckt oder gestaucht werden und die relative Lage der Bildpunkte zueinander verändert wird (Geoinformatik GmbH 2009). Auf diese Weise können Verzerrungen als Folge des Scanvorgangs der originalen Kartenvorlagen zumindest teilweise ausgeglichen werden. Welche Transformation zur Anwendung kam, wurde nach Größe des jeweils durch ArcGIS berechneten mittleren Fehlers zwischen den tatsächlichen und den transformierten Positionen der Passpunkte entschieden. Grundsätzlich wurde eine Georeferenzierung nur dann abgeschlossen, wenn der mittlere Fehler kleiner als 10 m war.

Nach der Georeferenzierung begann die Digitalisierung aller Höheninformationen auf einem Kartenblatt der Preußischen Landesaufnahme. Dazu wurden alle Höhenlinien sowie Höhenpunkte in einzelne Punkt-Shape-Dateien überführt (Ormsby et al. 2008). Die Digitalisierung erfolgte am Bildschirm in einem Maßstab von 1:3.000, sodass Lageungenauigkeiten beim Digitalisierungsvorgang minimiert werden konnten. Der Abstand der digitalisierten Punkte auf den Höhenlinien betrug je nach Reliefcharakteristik etwa zwischen 10 und 50 m, dies entsprach bei einem Digitalisierungsmaßstab von 1:3.000 ca. 3 bis 17 mm. Verteilt man alle digitalisierten Punkte gleichmäßig über die Fläche eines Kartenblattes, lässt sich ein theoretischer mittlerer Punktabstand berechnen, der auf Kartenblättern mit hoher Reliefenergie naturgemäß relativ klein ausfällt und Werte von ca. 40 m annimmt, während auf Kartenblättern im Bereich des Lippe- oder Emschertals mittlere Punktabstände von bis zu 100 m resultieren.

Im Anschluss an die Digitalisierung aller Höhenlinien und punkte wurden die ungleichmäßig auf der Kartenfläche verteilten Punktinformationen zur Interpolation

eines flächendeckenden Zellrasters mit einer Auflösung von 10 m genutzt. Zur Anwendung kam das geostatistische Verfahren der Kriging-Interpolation, da es für Daten mit unregelmäßigen Punktabständen besonders geeignet ist und darüber hinaus ein Interpolationsmodell unter Beachtung der spezifischen Reliefeigenschaften bereitstellt (Dutter 1985). Hierzu wird die Höhenvariabilität berücksichtigt und mithilfe sog. empirischer Semivarianzen quantifiziert, an die nachfolgend eine zuvor ausgewählte Modellfunktion, das sog. Variogrammodell, anzupassen ist. Dieses Modell kommt abschließend bei der Berechnung von Gewichtungsfaktoren bekannter Höhen in der Umgebung eines neu zu bestimmenden Höhenpunktes zum Einsatz (De Smith et al. 2008). Für die Auswahl eines geeigneten Variogrammodells wurde über eine sog. Kreuzvalidierung das Modell mit den kleinsten Vorhersagefehlern identifiziert. In allen Fällen betrug die sog. Nuggett-Varianz der Variogrammodelle Null, da nicht von vornherein eine Fehlertoleranz des digitalisierten Höhenwertes unterstellt werden sollte.

Als Datenquelle für die aktuellen Höhen im Ruhrgebiet diente das aus Laserscanbefliegungen abgeleitete Digitale Geländemodell mit einem Punktabstand von 10 m (DGM 5). Es wurde in ArcGIS ebenso wie die digitalisierten historischen Höhendaten zu einem Zellraster mit einer Auflösung von 10 m interpoliert. Aufgrund des regelmäßig vorliegenden hoch aufgelösten Punktrasters genügte als Interpolationsverfahren die vergleichsweise einfache Inverse Distanzgewichtung (»Inverse Distance Weighting (IDW)«) (Bill 1999).

Nach Abschluss dieser Vorarbeiten lagen für jedes Kartenblatt im Blattschnitt der Topographischen Karte 1:25.000 zwei Zellraster mit historischen bzw. aktuellen Höheninformationen in einer Auflösung von 10 m vor. Schließlich wurden die beiden Zellraster zu einem Differenzmodell verschnitten, um Höhenänderungen zwischen dem Jahr 1892 und der heutigen Geländeoberfläche quantifizieren und lokalisieren zu können. Es entstanden entsprechend des Blattschnittes der TK 25 insgesamt 21 Karten mit den berechneten Höhendifferenzen, die einer weiterführenden Analyse unterzogen werden konnten.

Darüber hinaus war es nun möglich, mithilfe des Geographischen Informationssystems Differenzvolumen zwischen der historischen und aktuellen Geländeoberfläche zu berechnen, auf deren Basis eine Volumenbilanzierung erfolgte. Diese erlaubt für ein Kartenblatt oder andere beliebige Raumausschnitte die Abschätzung von Nettohöhendifferenzen, da nicht nur bergsenkungsbedingte Verlustvolumen, sondern auch Füllvolumen, z. B. als Folge der Aufhaldung von Bergematerial, Berücksichtigung finden.

Zur Detektion bergbaubedingter Senkungen dienten ehemalige und aktuelle Schachtstandorte, die von der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung 6 (Bergbau und Energie in NRW), als Shape-Dateien zur Verfügung gestellt wurden. Eine weitere Interpretationshilfe bot das sog.

»Informationssystem Geologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes im Maßstab 1:10.000«, bereitgestellt vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen, mit dessen Hilfe im Geographischen Informationssystem Zusammenhänge zwischen geologischen Strukturen des Steinkohlengebirges und den Höhenänderungen aufgedeckt werden konnten.

3 Ergebnisse

In den folgenden Ergebnisdarstellungen sollen ausgewählte Beispiele die Eignung der beschriebenen Methodik zur Detektion und Visualisierung bergbaubedingter Senkungen beleuchten. Zunächst sei eine Übersicht der berechneten Höhendifferenzen zwischen dem historischen und aktuellen Geländemodell präsentiert, die aus der Kombination aller 21 bearbeiteten Kartenblätter entstand (s. Abb. 1). Alle Geländebereiche, die im Vergleich zur Situation von 1892 tiefer liegen, sind mit negativen Höhendifferenzen und einer Farbabstufung von grün, über orange bis dunkelrot abgebildet. Solche Flächen, die höher liegen als im Jahr 1892, sind mit Abstufungen in blauer Farbe dargestellt. Höhendifferenzen, die sich zwischen +2 m und -2 m bewegen, erhalten aus Gründen möglicher Fehler der berechneten Höhendifferenzen keine farbliche Kennzeichnung. Insgesamt fällt eine Häufung großer Flächen mit Höhendifferenzen von -20 m und mehr im Bereich der zentralen Emscherniederung auf. Besonders auffällig sind Abschnitte zwischen Essen und Gelsenkirchen sowie im Umfeld von Gelsenkirchen und Herten. Weitere, vergleichsweise isoliert auftretende, häufig oval bis kreisrund geformte Flächen mit negativen Höhendifferenzen sind im Stadtgebiet von Bottrop sowie nördlich davon, am linken Niederrhein, am Nordrand des Ruhrgebiets sowie im Umfeld Dortmunds und nordöstlich davon zu erkennen. Hierbei fällt auf, dass die beschriebenen Bereiche entlang WSW-ONO-orientierter Linien verlaufen und offensichtlich der Raumrichtung geologischer Strukturen folgen. Tatsächlich zeigen die Achsen der großen geologischen Hauptmulden im Steinkohlengebirge die gleiche Orientierung, auch als variskisches Streichen bezeichnet (Grabert 1998, Kukuk und Hahne 1962). Dies legt die Vermutung nahe, dass die identifizierten Flächen mit negativen Höhendifferenzen auf den intensiven Abbau von Steinkohle entlang der besonders abbauwürdigen flachen Hauptmulden des Steinkohlengebirges zurückzuführen und demzufolge als Bergsenkungen zu interpretieren sind. Ein weiterer Beleg für diese Vermutung ist in der Abhängigkeit zwischen dem Verlauf bedeutender Störungen im Steinkohlengebirge und der Verbreitung von Flächen mit negativen Höhendifferenzen erkennbar. Stellenweise begrenzt eine solche Störung die Verbreitung von Senkungsgebieten, wie etwa im Norden Bottrops, Dortmunds oder aber am Niederrhein. Tatsächlich endet ein Flöz im Steinkohlengebirge

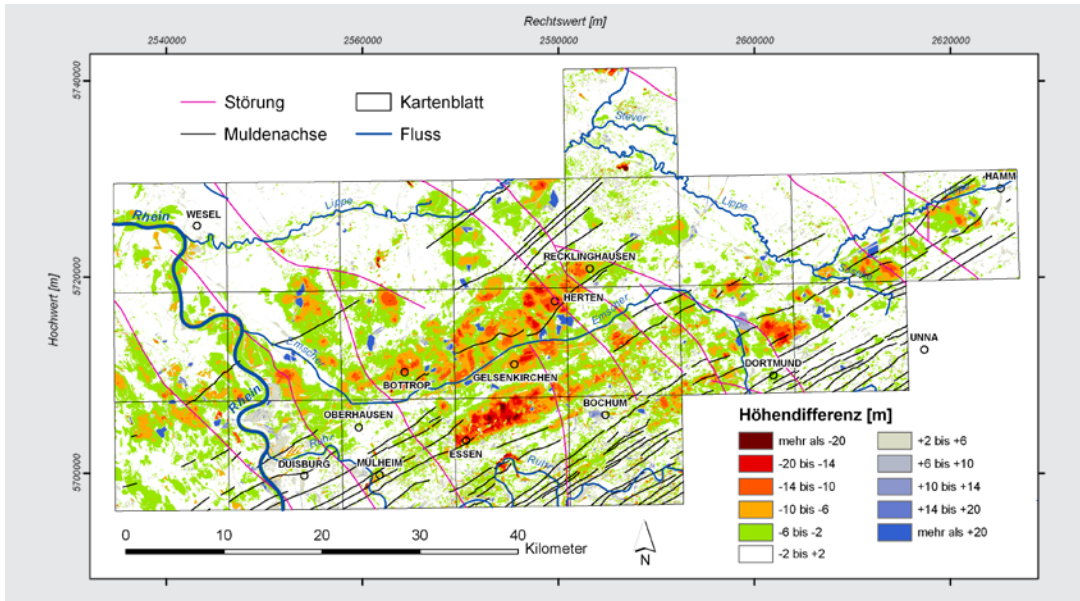


Abb. 1: Übersicht der berechneten Höhendifferenzen im Untersuchungsgebiet

häufig an einer Querstörung – auch als »Sprung« bezeichnet (Hahne und Schmidt 1982) – und ist entsprechend des jeweiligen Verwerfungsbetrags einer Störung um bis zu mehreren hundert Metern in der Vertikalen versetzt. Folglich endet auch der Abbau an einer solchen Stelle im Untergrund und die resultierende Bergsenkung an der Geländeoberfläche bleibt auf einen Bereich diesseits der Störung beschränkt.

Im Folgenden soll die Aufmerksamkeit auf den bereits angesprochenen Bereich mit negativen Höhendifferenzen von mehr als -20m nördlich des Stadtkerns von Essen gerichtet werden. Abb. 2 zeigt einen entsprechenden Ausschnitt, in dem die berechneten Höhendifferenzen sowie die Lage ehemaliger Schachtstandorte eingetragen sind. Es fällt auf, dass die außergewöhnlich hohen negativen Höhendifferenzen mit einer hohen Dichte von Schachtstandorten zusammenfallen. Es handelt sich u. a. um Schächte der ehemaligen Zeche Zollverein, von de-

nen Schacht 12 im Jahr 2003 als Weltkulturerbe einen internationalen Bekanntheitsgrad erlangt hat (Huske 2006). Zollverein gehört zu den Zechen mit der längsten Abbaugeschichte: »Der Lebensbogen des Bergwerks Zollverein umfasst mit dem Abteufbeginn von Schacht 1 im Jahre 1847 bis zur Stilllegung im Jahre 1986 den gesamten Zeitraum des modernen Tiefbaus, der den wirtschaftlichen und u. a. auch landschaftlichen Charakter des Ruhrgebiets entscheidend geprägt hat« (Hermann und Hermann 2008, S. 217 f.). Die lange Abbaugeschichte der Zeche Zollverein sowie ihre kontinuierliche Ausweitung zum großräumigen Verbundbergwerk lassen vermuten, dass die hohen Werte negativer Höhendifferenzen auf den Steinkohlebergbau zurückzuführen und als zusammenhängendes Areal von Bergsenkungen zu deuten sind. Ein Profil durch das Tal des Schwarzbaches bis auf den kleinen Hügel des Mechtenbergs zeigt, dass Senkungen von bis zu 25m auftreten können und auch Vollformen

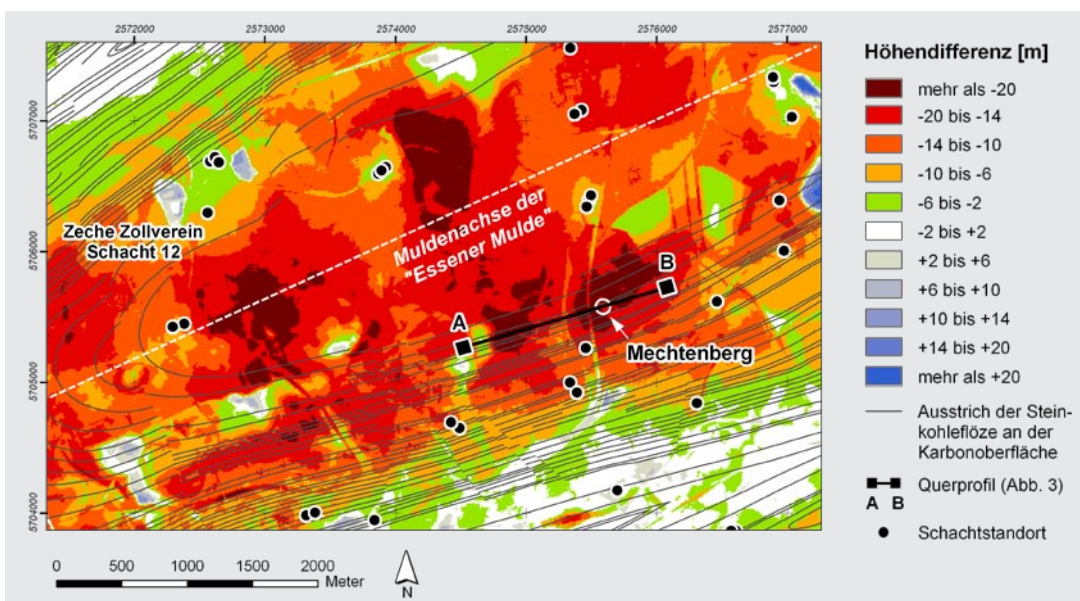


Abb. 2: Berechnete Höhendifferenzen in einem Ausschnitt des Blattes 4508 Essen

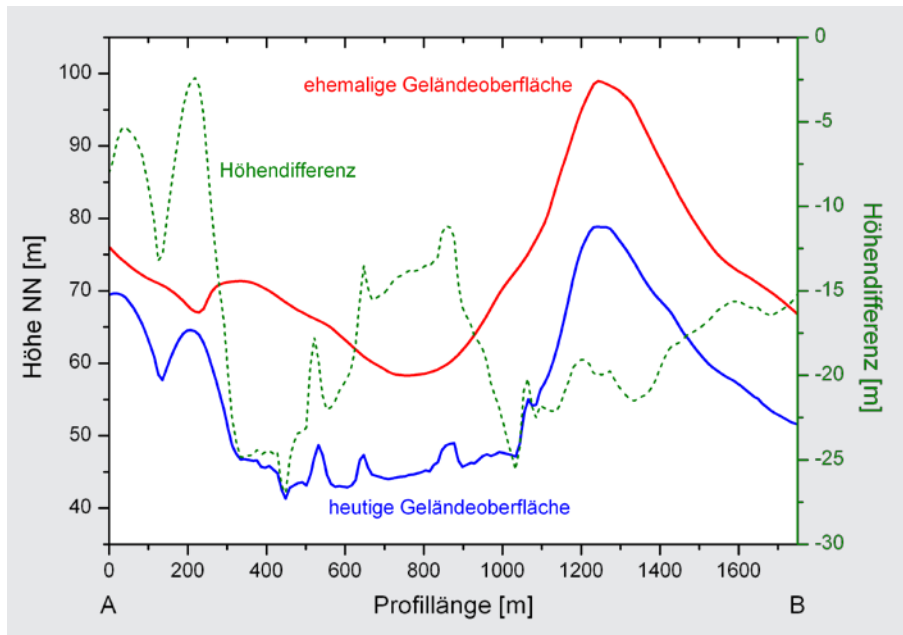


Abb. 3: Querprofil entlang der Profilstrecke AB mit der ehemaligen und heutigen Geländeoberfläche sowie den berechneten Höhendifferenzen in einem Ausschnitt des Blattes 4508 Essen

nicht von Bergsenkungen verschont sind (s. Abb. 3). Bergsenkungen treten entgegen der weit verbreiteten Vorstellung nicht zwangsläufig als morphologische Senken mit den bekannten Begleiterscheinungen wie Bergsenkungsseen oder vernässten Wiesen in Erscheinung, sondern können großräumig auch Kuppenpositionen erfassen, ohne im Gelände als Senkungsgebiet wahrgenommen zu werden. In Abb. 2 deuten die eingetragenen Ausstriche von Steinkohleflözen an der Oberfläche des Steinkohlegebirges die Lage der Bergsenkungsgebiete entlang der sog. Essener Mulde mit flachlagernden und

1200m erreicht waren (Huske 2006). Ein Indiz für die Identifizierung der Fläche negativer Höhendifferenzen als Bergsenkungsgebiet ist nicht nur die Nähe der Schachtstandorte, sondern auch eine vernachlässigbare Höhendifferenz im Umfeld der Schächte 1, 2, 4 und 7. Tatsächlich erfolgt der Abbau der Steinkohle zumeist deutlich abseits der Förderschächte, deren Standsicherheit gewährleistet bleiben muss, sodass hier auch keine Bergsenkungen auftreten. Lediglich Schacht 3 scheint nach seiner Nutzung als Förderschacht in tieferen Sohlen unterbaut worden zu sein, da hier Höhendifferenzen von

besonders abbauwürdigen Steinkohleflözen an.

Das zweite großmaßstäbige Beispiel zeigt einen Ausschnitt nordwestlich des Stadtkerns von Dortmund mit einer auch in der Übersichtskarte (s. Abb. 1) auffälligen, isoliert erscheinenden Fläche vergleichsweise hoher negativer Höhendifferenzen von bis zu -20m (Abb. 4). Sie befindet sich offensichtlich im Einwirkungsbereich des Steinkohleabbaus der ehemaligen Zeche Minister Stein, deren Schachtstandorte auf der Karte eingetragen sind. Ähnlich wie die Zeche Zollverein kann die Zeche Minister Stein auf eine lange Geschichte zurückblicken: Bereits im Jahr 1875 begann die Förderung in 260m Tiefe und endete erst im Jahr 1987, nachdem Fördertiefen von annähernd

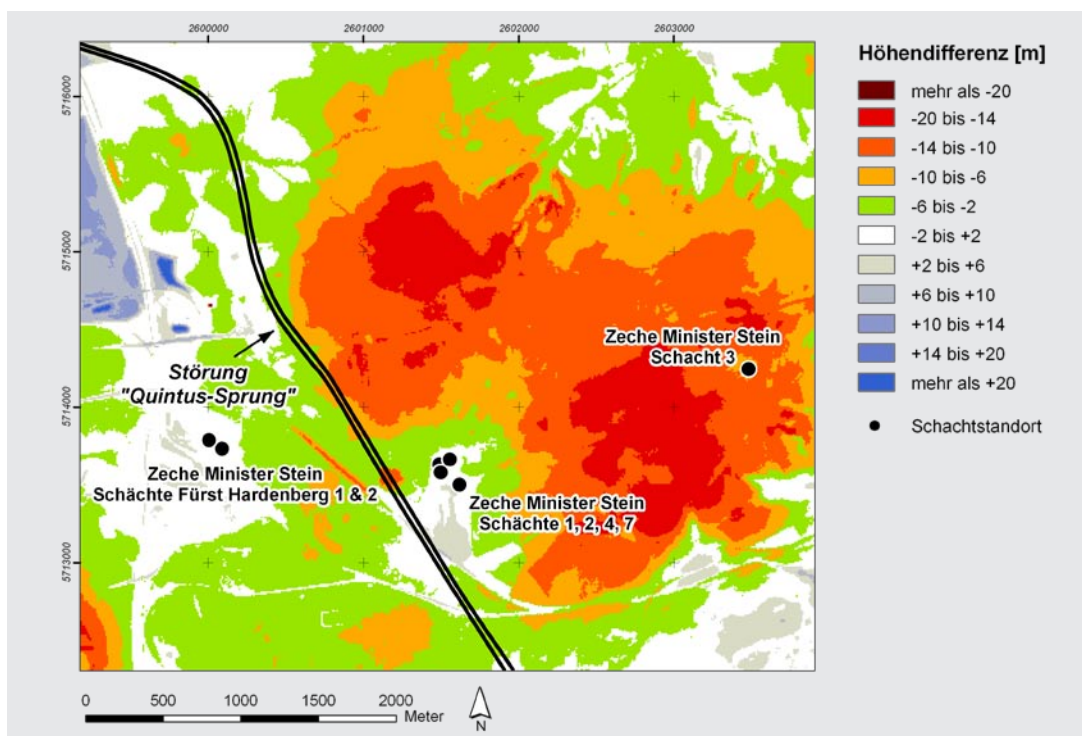


Abb. 4: Berechnete Höhendifferenzen in einem Ausschnitt des Blattes 4410 Dortmund

etwa -6 bis -10 m berechnet werden konnten. Ein Blick auf die Geschichte der Zeche Minister Stein bestätigt diese Vermutung, da die Seilfahrt in Schacht 3 bereits im Jahr 1965 eingestellt wurde und nachfolgend nur noch eine Nutzung als Wetterschacht erfolgte (Huske 2006). Besondere Beachtung verdient die im Kartenausschnitt erkennbare Störung des sog. »Quintus-Sprungs«, einer der bedeutendsten Querstörungen im Steinkohleengebirge mit

mina verbleibt ein Nettoverlustvolumen von 0,664 km³. Unter Berücksichtigung der gesamten Kartenfläche von 128,5 km² lässt sich somit eine Nettohöhendifferenz von -5,16 m (= 0,664 km³ ÷ 128,5 km²) berechnen. Zur Veranschaulichung des Ausmaßes einer derart dimensionierten Geländeabsenkung diene der folgende Vergleich: Insgesamt 18.000 Fußballfelder mit einer üblichen Kantenlänge von 105 × 68 m müssten nebeneinander liegend etwa

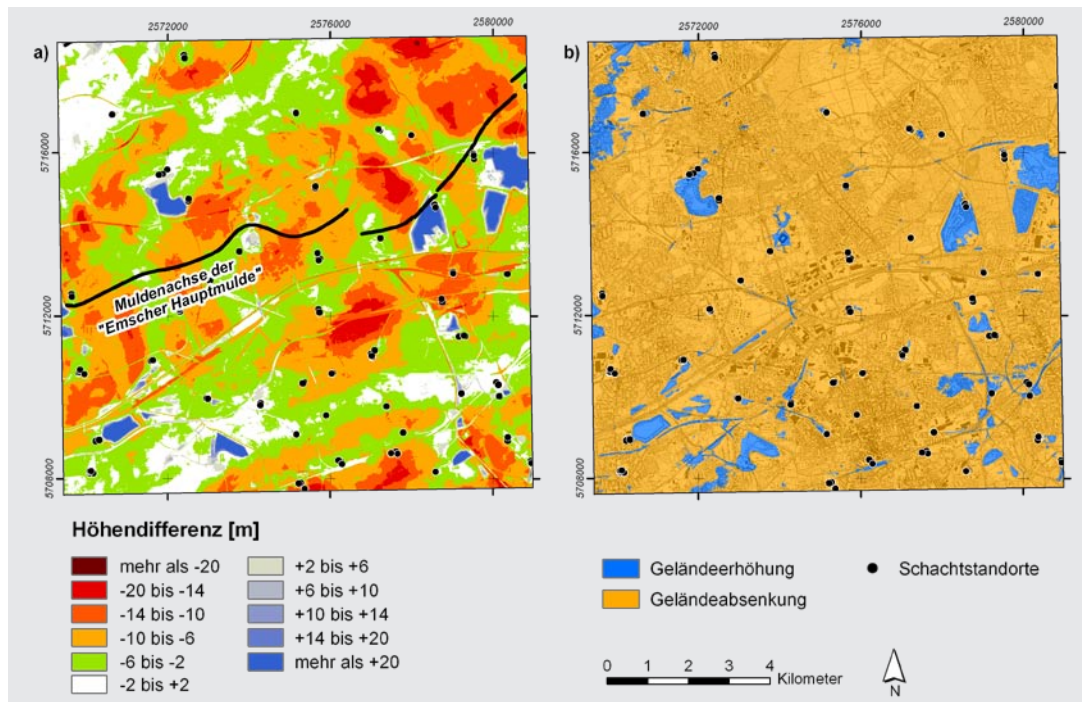


Abb. 5:
a) Berechnete Höhendifferenzen, Blatt 4408 Gelsenkirchen, b) Gebiete mit Geländeerhöhung bzw. -absenkung, Blatt 4408 Gelsenkirchen

einer Sprunghöhe von etwa 1000 m (Kukuk 1938), die den Steinkohleabbau in südwestlicher Richtung behindert hat und eine entsprechende Bergsenkung auf den nordöstlichen Bereich beschränkt.

In Abb. 5a sind die berechneten Höhendifferenzen des Kartenblattes Gelsenkirchen dargestellt. Aufgrund der Lage im Bereich der sog. Emscher Hauptmulde und der entsprechend intensiven Steinkohleförderung sind flächendeckend negative Höhendifferenzen erkennbar. Zu den bekanntesten auf der Kartenübersicht eingetragenen Schachtstandorten gehören diejenigen der Zechen Hugo, Ewald, Consolidation, Nordstern, Graf Bismarck und Zollverein. Auf der benachbarten Karte (s. Abb. 5b) sind alle Flächen, die im Vergleich zur Geländeabsetzung im Jahr 1892 tiefer liegen, orange dargestellt, alle Bereiche mit einer höheren Lage sind in blau abgebildet. Bei den blauen Flächen handelt es sich überwiegend um Bergehalden sowie als lineare Strukturen erkennbare Straßendämme. Insgesamt liegen fast 93% der Kartenfläche (128,5 km²) tiefer als noch im Jahr 1892, nur 7% haben eine Erhöhung erfahren. Berechnet man das Differenzvolumen zwischen der ehemaligen und heutigen Geländeoberfläche, ist ein überwiegend bergsenkungsbedingtes Verlustvolumen von 0,777 km³ festzustellen. Das u. a. auf Bergehalden zurückzuführende Füllvolumen beläuft sich auf lediglich 0,113 km³. Nach Bilanzierung beider Volu-

um die Höhe eines zweigeschossigen Gebäudes abgesenkt werden, um die oben beschriebenen Verhältnisse auf dem Kartenblatt Gelsenkirchen widerzuspiegeln.

4 Diskussion

Die beschriebenen Ergebnisse zur flächendeckenden Quantifizierung bergbaubedingter Höhendifferenzen zwischen der Geländeoberfläche des Jahres 1892 und dem heutigen Relief basieren auf einer Digitalisierung von Höhenlinien und -punkten in Karten der Preußischen Landesaufnahme. Eine Fehlerbetrachtung zur dargestellten Methodik erfordert daher u. a. die Identifizierung möglicher Fehler im Umgang mit den Höheninformationen der historischen Karten.

In Kapitel 2 wurde bereits ausführlich auf die Entstehung von Höhenlinien bei der Messtischaufnahme eingegangen und beschrieben, dass ihre Lage unter Berücksichtigung der millimeter- und dezimetergenau erfassten Höhen der Nivellements- bzw. ausgewählter Geländepunkte vom Topographen händisch im Maßstab 1 : 25.000 eingetragen wurde. Je nach Hangneigung übertragen sich die Messfehler der Höhenpunkte auf die Höhenlinien. In Anbetracht der beschriebenen Gesetzmäßigkeiten (s. Kost

1937) zur Fehlerabschätzung sind bei Geländeneigungen von 10° Höhenfehler der Höhenlinien auf Karten der Preußischen Landesaufnahme von bis zu $\pm 3,4\text{ m}$ zu erwarten, bei $20^\circ \pm 6,3\text{ m}$, bei $30^\circ \pm 9,5\text{ m}$ und bei $40^\circ \pm 13,4\text{ m}$. Hangneigungen von mehr als 40° treten im Ruhrgebiet fast ausschließlich entlang des Ruhrtals an den steilen Talhängen auf. Ein Großteil des vom Tiefbergbau und entsprechenden Bergsenkungen betroffenen Ruhrgebiets

Fehlerquelle erwächst aus der Georeferenzierung der Karten zur Preußischen Landesaufnahme. Wie eingangs beschrieben, wurde dieser Fehler minimiert, indem neben den vier Blattecken mindestens zwei weitere Passpunkte zum Einsatz kamen. Als mittlere Abweichung zwischen den tatsächlichen und transformierten Positionen wurde ein maximaler Wert von nur 10 m toleriert. Auf Karten im Maßstab $1:25.000$ entspricht dies in etwa der gra-

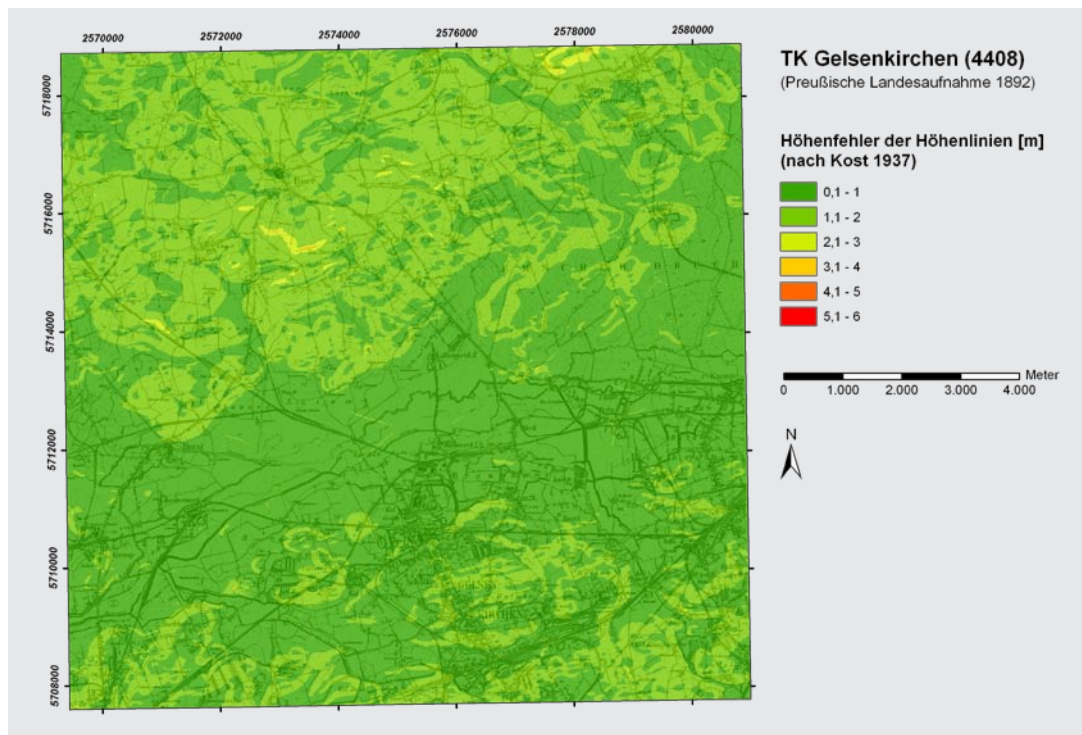


Abb. 6: Höhenfehler der Höhenlinien auf einer Karte der Preußischen Landesaufnahme, Blatt 4408 Gelsenkirchen

erstreckt sich über die Hellweg- und Emscherzone, die Lippeniederung sowie entlang des Niederrheins. Hier sind Geländeneigungen von mehr als 10° selten, sodass in einem Großteil des Ruhrgebiets der Höhenfehler von Höhenlinien maximal etwa $\pm 3,4\text{ m}$ betragen dürfte. Auf Basis von Gleichung 1 wurde in Abhängigkeit von der Geländeneigung der Höhenfehler für das Kartenblatt Gelsenkirchen berechnet (s. Abb. 6). Es bestätigt sich die Annahme eines geringen Höhenfehlers im Bereich der zentralen Emscherniederung, die das Kartenblatt von West nach Ost quert. Daneben ist der Lagefehler einer Höhenlinie zu beachten, der entsprechend den Gesetzmäßigkeiten aus Kost (1937) (s. oben) bei abnehmenden Geländeneigungen wächst. Bei Geländeneigungen von 1° kann nach Gleichung 2 der Lagefehler $\pm 60\text{ m}$ ausmachen, bei $0,5^\circ$ sind es bereits $\pm 106\text{ m}$ und bei $0,1^\circ \pm 473\text{ m}$. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die mit einer Zellauflösung von 10 m interpolierten historischen Höhen eine Lagegenauigkeit vortäuschen, die für einen Großteil des Ruhrgebiets kritisch zu beleuchten ist. Für das weitere Vorgehen ist unter diesem Gesichtspunkt zu empfehlen, die Zellgrößen auf 50 bis 100 m zu erhöhen.

Neben Ungenauigkeiten im Zuge der Primärdatenerhebung sind weitere Fehler in der nachfolgenden Verarbeitung der Primärdaten zu erwarten. Eine mögliche

phischen Mindestgröße für Punktsignaturen (Hake et al. 2002). Trotz dieser hohen Anforderung an die Genauigkeit der Georeferenzierung sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein geringer mittlerer Fehler in der Abweichung zwischen den tatsächlichen und transformierten Positionen nicht zwangsläufig eine genaue Georeferenzierung bedeutet (Geoinformatik GmbH 2009).

Höhenfehler als Folge des Digitalisierungsvorgangs sind vor allem auf eine ungenaue Positionierung eines Digitalisierungspunktes auf einer Höhenlinie zurückzuführen. Dieser Fehler wurde unter Beachtung eines vergleichsweise großen Digitalisierungsmaßstabs von $1:3.000$ minimiert. Auch hier sind die größten Unsicherheiten in Geländeabschnitten mit hohen Geländeneigungen zu erwarten.

Vergleichsweise leicht zu beziffernde Fehler entstehen als Folge der geostatistisch reproduzierbaren Interpolation historischer Höhen für Punkte abseits bekannter Höhenlinien oder -punkte. Im Fall der Kriging-Interpolation erlaubt das Verfahren die Berechnung eines Standardfehlers des Vorhersagewertes (De Smith et al. 2008), der mit zunehmendem Abstand von einem Punkt bekannter Höhe wächst und im vorgestellten Projekt die Vorhersageunsicherheit in Bereichen mit geringem Höhenlinienbesatz andeutet. In Niederungslandschaften ist der berechnete

Standardfehler zwangsläufig hoch, da die Zahl der Höhenlinien naturgemäß gering ausfällt. Von besonderer Bedeutung für die Fehlerabschätzung der berechneten Höhendifferenzen sind hohe Standardfehler in Gebieten, die bereits Ende des 19. Jahrhunderts dicht bebaut und auf den Karten der Preußischen Landesaufnahme nicht oder nur schwach durch Höhenlinien abgedeckt waren. Als Beispiel für die Berechnung des Standardfehlers eines

die Schwerpunkte intensiver Steinkohleförderung gerade in den zuletzt genannten Abschnitten des Ruhrgebiets liegen, scheinen die hier berechneten Höhendifferenzen mit ihren z.T. hohen Beträgen aussagekräftig zu sein, obgleich eine gewisse Lageunschärfe angenommen werden muss. Zu bedenken ist jedoch in Gebieten mit geringen Geländeneigungen sowie einer starken Überbauung im Jahr 1892 und einer entsprechend geringen Punktdichte

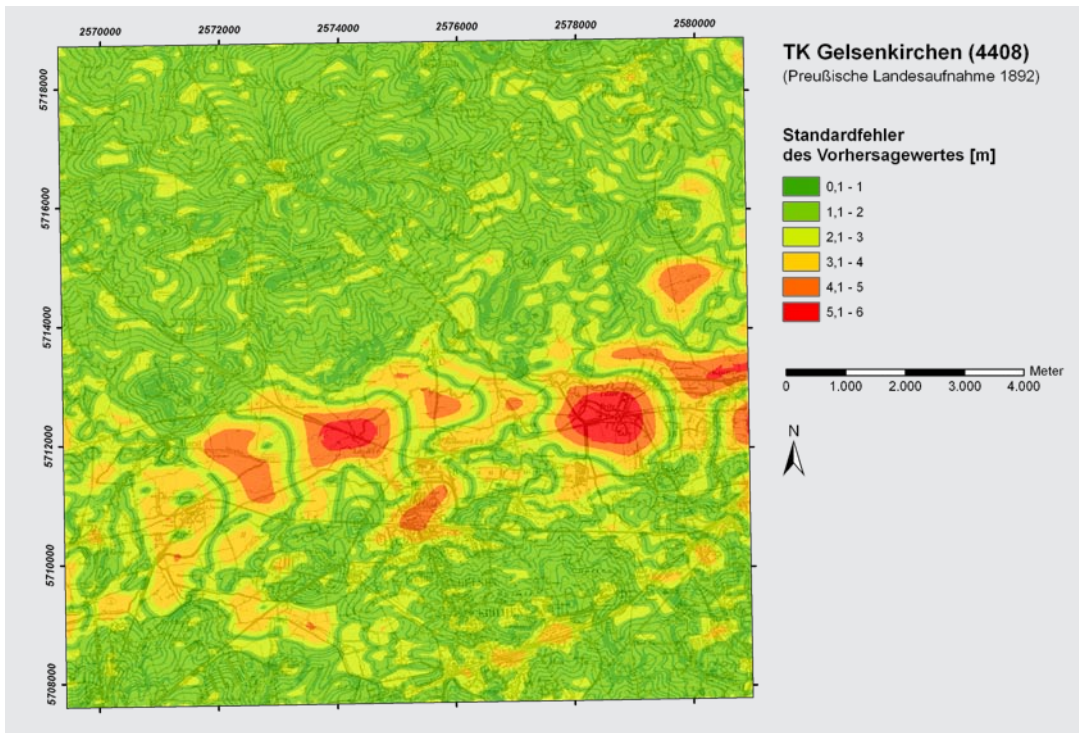


Abb. 7: Standardfehler des Vorhersagewertes nach Kriging-Interpolation des historischen Geländemodells, Blatt 4408 Gelsenkirchen

Vorhersagewertes historischer Höhen dient wiederum das Kartenblatt Gelsenkirchen (s. Abb. 7): Hohe Werte von bis zu ± 6 m treten im Bereich der Emscherniederung auf, wo naturgemäß ein geringer Höhenlinienbesatz zu verzeichnen ist.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Höhenfehler, die auf die Qualität der Primärdaten in den Karten der Preußischen Landesaufnahme zurückzuführen sind, in stark reliefiertem Gelände vergleichsweise groß, in flacheren Arealen hingegen klein ausfallen werden. Lagefehler verhalten sich entgegengesetzt: Große Unsicherheiten der Positionsangabe sind bei geringen Geländeneigungen zu erwarten, kleine hingegen in Gebieten mit hoher Reliefenergie. Übertragen auf die Reliefcharakteristik im Ruhrgebiet sind insbesondere im südlichen Teil, in den Ausläufern des Rheinischen Schiefergebirges mit den zahlreichen z.T. steilwandigen Kerbtälern, relativ große Ungenauigkeiten berechneter Höhendifferenzen zu erwarten, die u.a. auf große Höhenfehler der historischen Höheninformationen zurückzuführen sind. Im Bereich der Hellwegzone und insbesondere der flachen Emscherniederung sowie entlang des Lippetals können vergleichsweise belastbare Werte der berechneten Höhendifferenzen angenommen werden, solange man keine hohen Ansprüche an die Lagegenauigkeit eines Differenzwertes stellt. Da

bekannter Höhen, dass die Unsicherheit des geostatistisch berechneten Vorhersagewertes interpolierter historischer Höhen wächst. Davon sind u.a. die Auenbereiche von Emscher, Lippe und Rhein, aber auch die bereits im Jahr 1892 zu beobachtenden Siedlungskerne der Hellweg- und Emscherzone betroffen.

Berücksichtigt man beide bislang quantifizierbaren Fehler, den Höhenfehler der Höhenlinien auf Karten der Preußischen Landesaufnahme sowie den Standardfehler des Vorhersagewertes nach Kriging-Interpolation, lässt sich nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz unter der vereinfachenden Annahme zweier unabhängiger additiver Fehler Δx_1 und Δx_2 ein Gesamtfehler Δy des historischen Geländemodells wie folgt abschätzen (Sachs und Hedderich 2009):

$$\Delta y = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2} \tag{3}$$

Für das Kartenblatt Gelsenkirchen resultiert das in Abb. 8 dargestellte Ergebnis. Die berechneten Gesamtfehler sind als Linienschraffuren zusammen mit den berechneten Höhendifferenzen abgebildet. Auf einem Großteil des Kartenblattes (56% der Kartenfläche) betragen die Gesamtfehler weniger als ± 2 m. Vereinzelt Zonen hoher Unsicherheit mit Werten von mehr als ± 5 m treten im

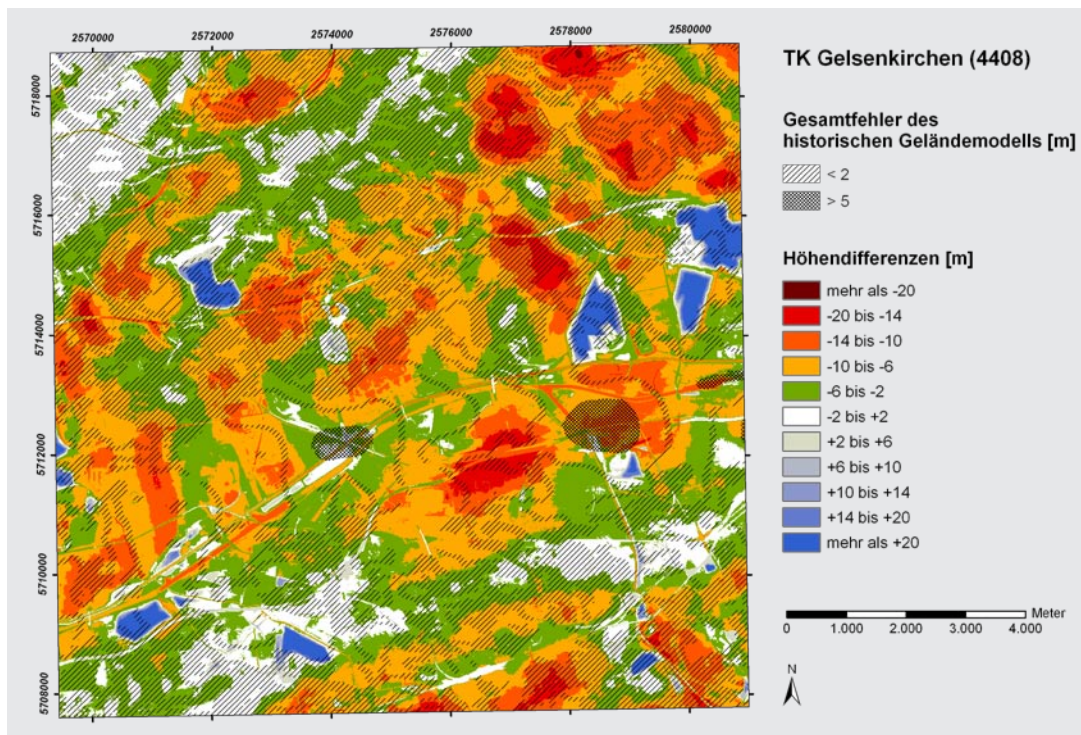


Abb. 8: Berechnete Höhendifferenzen und Gesamtfehler des historischen Geländemodells, Blatt 4408 Gelsenkirchen

Bereich der zentralen Emscherniederung auf (1,2% der Kartenfläche). Hier ist entsprechende Vorsicht bei der Bezifferung eines exakten Bergsenkungsbetrags geboten.

Im weiteren Projektverlauf wird angestrebt, die Fehlerbetrachtung zu präzisieren und auch die übrigen angedeuteten Fehlerquellen zu berücksichtigen, um abschließend flächendeckend Angaben zur Fehlertoleranz berechneter Höhendifferenzen zu präsentieren.

Eine Möglichkeit der Validierung und Plausibilitätskontrolle berechneter Höhendifferenzen ist für ausgewählte Punkte unter Berücksichtigung des sog. Leitnivellements möglich, das im Auftrag des ehemaligen Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen in relativ kurzen Zeitabständen durchgeführt wird, um Änderungen des Höhenfestpunktfeldes in den Bergbaugebieten zu überwachen (Haupt 1999b). Das Leitnivellement im Ruhrgebiet geht bis auf das Jahr 1899 zurück, als erstmals durch das Oberbergamt Dortmund 424 Punkte nivelliert wurden (Haupt 1999a). Seit 1948 wird das Leitnivellement im Zwei-Jahres-Turnus wiederholt, und seit 1988 wird alle vier Jahre ein sog. großes Leitnivellement durchgeführt, bei dem 1600 Nivellementpunkte angemessen werden. Ausgewählte Daten des Leitnivellements wurden vom ehemaligen Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen zur Verfügung gestellt.

Von besonderem Wert waren elf Nivellementpunkte, deren Erstvermessung sogar bis auf das Jahr 1895 zurückgeht. Ein Vergleich der im Jahr 1895 vermessenen Höhen mit den auf Basis der Angaben in Karten der Preußischen Landesaufnahme interpolierten Höhen des Jahres 1892 führte zu folgendem Ergebnis: Insgesamt weichen die vermessenen Höhen von zehn Nivellementpunkten um maximal nur 0,9 Meter von den interpolierten Höhen ab, nur die vermessene Höhe eines Nivellementpunk-

tes unterscheidet sich um mehr als vier Meter von der berechneten Höhe des Jahres 1892. Neben den elf Nivellementpunkten mit einer Ersterfassung im Jahr 1895 wurden die Daten 135 weiterer ausgewählter Nivellementpunkte ausgewertet, die mindestens bis auf das Jahr 1951 zurückzuverfolgen sind. Sie ermöglichen zumindest eine Plausibilitätskontrolle, indem die im Leitnivellement dokumentierte Höhenentwicklung mit der interpolierten Höhe des Jahres 1892 verglichen wird. Zeigten die berechneten Höhendifferenzen einen höheren Wert als den im Leitnivellement zwischen der Ersterfassung eines Punktes und seiner aktuellen Geländehöhe dokumentierten, so war zu überprüfen, ob schon vor der Ersterfassung eine Bergsenkung eintrat. Dies konnte in den meisten Fällen bestätigt werden. Wiesen die berechneten Höhendifferenzen jedoch einen kleineren Wert als den im Leitnivellement dokumentierten auf, mussten andere Ursachen in Betracht gezogen werden. In den meisten Fällen lagen die Abweichungen deutlich unter 2 m. Bei insgesamt nur 15 der 148 Fälle traten größeren Abweichungen auf, für die als Ursachen zumeist besondere topographische Verhältnisse und seltener eine außergewöhnlich geringe Punktdichte digitalisierter Höhen in dicht bebauten Gebieten infrage kamen.

5 Fazit

Auf Basis von insgesamt 21 Kartenblättern der Preußischen Landesaufnahme aus dem Jahr 1892 im Maßstab 1:25.000 wurden sämtliche Höhenlinien und -punkte in einem Geographischen Informationssystem digitalisiert, um anschließend ein Geländemodell der historischen Hö-

hen als Zellraster mit einer Auflösung von 10 m zu interpolieren. Es folgte die Berechnung von Höhendifferenzen zwischen dem historischen und aktuellen Geländemodell, das als DGM 5 vom ehemaligen Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen zur Verfügung gestellt wurde. Damit liegen erstmals flächendeckend und großmaßstäbig Informationen zu Veränderungen der Geländehöhen zwischen dem Jahr 1892 und heute für einen Großteil des vom Bergbau beeinflussten Ruhrgebiets vor.

Eine Auswertung der Daten zeigt maximale Höhenunterschiede von bis zu -25 m für Teile des Essener Stadtgebietes. Großflächige Areale des Ruhrgebiets weisen Höhenunterschiede von -10 m und deutlich mehr auf. Sie orientieren sich zumeist entlang der großen geologischen Hauptmulden sowie einzelner Störungen des Steinkohlengebirges und zeigen häufig einen rundlichen bis ovalen Grundriss. Mit hoher Wahrscheinlichkeit können solche Bereiche damit auf den untertägigen Steinkohleabbau zurückgeführt und als Bergsenkungsgebiete angesprochen werden. Die nunmehr flächendeckend vorliegenden Informationen zu Höhendifferenzen ermöglichen die Detektion von Bergsenkungsgebieten auch dort, wo die üblichen Geländebefunde wie vernässte Stellen, Mulden oder gar Bergsenkungsseen versagen würden. Tatsächlich können auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten zahlreiche Vollformen wie Rücken oder Kuppen als Bergsenkungsgebiete angesprochen werden, ohne dass man sie als solche im Gelände wahrnehmen würde.

Das Geographische Informationssystem ermöglicht darüber hinaus eine flächendeckende Bilanzierung der Höhenänderungen, in dem für einen beliebigen Raumausschnitt alle erhöhten Areale – überwiegend Bergeshalden – zu den abgesunkenen Gebieten – u. a. Bergsenkungen – in Beziehungen gesetzt werden. Somit ist eine Berechnung von Nett Höhendifferenzen möglich, die sämtliche, überwiegend bergbaubedingten Höhenänderungen einbezieht. Für das Kartenblatt Gelsenkirchen mit einer Fläche von $128,5\text{ km}^2$ beispielsweise resultiert eine Nett Höhendifferenz von $-5,16\text{ m}$. Für das gesamte Untersuchungsgebiet von ca. 2700 km^2 resultiert eine Nett Höhendifferenz von $-1,6\text{ m}$.

Die Diskussion der Ergebnisse zeigt, dass die größten Fehlerquellen in der Primärdatenerhebung, d. h. in der Vermessung und kartographischen Darstellung der historischen Höhen zu suchen sind. Erste Ansätze einer Quantifizierung der Unsicherheiten deuten an, dass in den zentralen, überwiegend flachen Arealen des Ruhrgebiets, die in besonderem Maße vom Steinkohlenbergbau betroffen sind, aufgrund überwiegend geringer Geländeneigungen Höhenfehler der historischen Höhenlinien von in seltenen Fällen maximal ± 3 bis 4 m anzunehmen sind. Vorsicht ist in den äußerst flachen Niederungen der Emscher-, Lippe- und Rheinaue sowie in dicht bebauten Gebieten des Jahres 1892 geboten, wo aufgrund einer geringen Punktdichte bekannter Höhen eine relativ hohe Unsicherheit des Vorhersagewertes nach der Kriging-Interpolation verbleibt. Eine Berücksichtigung beider Unsicherheiten am

Beispiel des Kartenblattes Gelsenkirchen offenbart auf einem Großteil der Fläche Gesamtfehler des historischen Geländemodells von maximal $\pm 2\text{ m}$, und nur in einzelnen Arealen der flachen Emscheraue steigt der Wert auf mehr als $\pm 5\text{ m}$ an.

Eine Validierung und Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse mithilfe ausgewählter Punkte des Leitnivelements zeigt eine erstaunlich gute Übereinstimmung berechneter und vermessener Höhendifferenzen. Die auf methodische Fehler zurückzuführenden Abweichungen liegen in den meisten Fällen im Bereich von lediglich 1 bis 2 Metern. Für die besonders vom Bergbau betroffenen vergleichsweise flachen Areale der Emscherniederung, Hellwegzone und des Lippetals scheint das vorgestellte Verfahren durchaus belastbare Ergebnisse zur Abschätzung bergbaubedingter Höhenänderungen im Maßstab 1 : 25.000 zu liefern.

Literatur

- Bell, F.G.; Donnelly, L.J.: Mining and its impact on the environment. Taylor & Francis, London u. a., 2006.
- Bell, F.G.; Stacey, T.R.; Genske, D.D.: Mining subsidence and its effect on the environment – some differing examples, *Environmental Geology* 40, S. 135–152, 2000.
- Bill, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme – Band 2: Analysen, Anwendungen und Neue Entwicklungen. Wichmann, Heidelberg, 1999.
- Bleidick, D.: Wirtschaft und Umwelt im Emscherraum im 19. Jahrhundert. In: Peters, R. (Hrsg.), 100 Jahre Wasserwirtschaft im Revier. Die Emschergenossenschaft 1899–1999, S. 22–32, Verlag Peter Pomp, Bottrop, Essen, 1999.
- De Smith, M.J.; Goodchild, M.F.; Longley, P.A.: Geospatial analysis – A comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Troubadour Publ., Leicester, 2008.
- Dutter, R.: Geostatistik – Eine Einführung mit Anwendungen. Teubner, Stuttgart, 1985.
- Emschergenossenschaft & Lippeverband (Hrsg.): Wo nichts mehr fließt, hilft nur noch pumpen – Pumpwerke – Schrittmacher der Wasserwirtschaft. Emschergenossenschaft & Lippeverband, Essen, 2008.
- Geoinformatik GmbH (Hrsg.): ArcGIS 9 – Das deutschsprachige Handbuch für ArcView und ArcEditor. Wichmann, Heidelberg, 2009.
- Grabert, H.: Abriss der Geologie von Nordrhein-Westfalen. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1998.
- Grothenn, D.: Die Preußischen Messtischblätter 1:25 000 in Niedersachsen – Erläuterungsheft zur »Preußischen Landesaufnahme«. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Landesvermessung, Hannover, 1994.
- Hahne, C.; Schmidt, R.: Die Geologie des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengebietes – Einführung in das Steinkohlengebirge und seine Montangeologie. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1982.
- Hake, G.; Grünreich, D.; Meng, L.: Kartographie – Visualisierung raumzeitlicher Informationen. De Gruyter, Berlin u. a., 2002.
- Haupt, P.: 100 Jahre Leitnivelements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens. Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst Nordrhein-Westfalen 32, S. 184–200, 1999a.
- Haupt, P.: Leitnivelements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens – Periodische Wiederholungsnivelements mit 100-jähriger Geschichte. Vermessungswesen und Raumordnung 61, S. 436–444, 1999b.
- Held, T.; Herget, J.: Umgestaltung von Flüssen. Emscher und Lippe als Beispiel. *Geographie und Schule* 27, S. 12–19, 2005.
- Hermann, W.; Hermann, G.: Die alten Zechen an der Ruhr. Karl Robert Langewiesche Nachfolger Hans Köster Verlagsbuchhandlung KG, Königstein im Taunus, 2008.
- Huske, J.: Die Steinkohlenzechen im Ruhrrevier – Daten und Fakten von den Anfängen bis 2005. Selbstverlag des Deutschen Bergbaumuseums Bochum, Bochum, 2006.

- Kost, R.W.: Die Entwicklung der Geländedarstellung in Karten mit besonderer Berücksichtigung der amtlichen Kartenwerke des Reichsamts für Landesaufnahme Berlin. Verlag des Reichsamts für Landesaufnahme, Berlin, 1937.
- Kratzsch, H.: Bergschadenskunde. Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum, 2008.
- Krauss, G.: 150 Jahre Preußische Meßtischblätter, Zeitschrift für Vermessungswesen 94, S. 125–135, 1969.
- Kukuk, P.: Geologie des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengbietes. Verlag von Julius Springer, Berlin, 1938.
- Kukuk, P.; Hahne, C.: Die Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengbietes (Ruhrreviers) in kurzgefaßter und verständlicher Form. Verlag C.Th. Kartenberg, Herne, 1962.
- Meyer, D.: Massenverlagerung durch Rohstoffgewinnung und ihre umweltgeologischen Folgen. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 137, S. 177–193, 1986.
- Meyer, D.: Geofaktor Mensch, Essener Unikate 19, S. 9–25, 2002.
- Meyer, H.H.F.: Die amtlichen Kartenwerke des Reichsamts für Landesaufnahme. Die Naturwissenschaften 18, S. 193–204, 1930.
- Ormsby, T.; Napoleon, E. J.; Burke, R.; Groessl, C.; Bowden, L.: Getting to Know ArcGIS Desktop – Basics of ArcView, ArcEditor, and ArcInfo. ESRI Press, Redlands, 2008.
- Peters, R.: Die Erhaltung der Vorflut. In: Peters, R. (Hrsg.), 100 Jahre Wasserwirtschaft im Revier. Die Emschergenossenschaft 1899–1999, S. 52–62, Verlag Peter Pomp, Bottrop, Essen, 1999.
- Pollmann, H.J.; Wilke, F.L.: Der untertägige Steinkohlenbergbau und seine Auswirkungen auf die Tagesoberfläche. Richard Boorberg Verlag, Stuttgart u. a., 1994.
- Rathke, K.: Hydrologisch-hydrogeologische Beeinträchtigungen. In: Wiggering, H. (Hrsg.), Steinkohlenbergbau – Steinkohle als Grundstoff, Energieträger und Umweltfaktor, S. 136–148, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1993.
- Reichsamt für Landesaufnahme (Hrsg.): Das Reichsamt für Landesaufnahme und seine Kartenwerke. Verlag des Reichsamts für Landesaufnahme, Berlin, 1931.
- Rhein, C.-L.: Aufgaben der Wasserverbände im Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenrevier. In: Quade, H. (Hrsg.), Rohstoffgewinnung und Landschaftsgestaltung, S. 37–44, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 2008.
- Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- Steinberg, H.G.: Die Entwicklung des Ruhrgebietes von 1840–1980, Spieker 32, S. 19–36, 1988.
- Szelag, S.; Weber, U.: Bergsenkung. In: Wiggering, H. (Hrsg.), Steinkohlenbergbau – Steinkohle als Grundstoff, Energieträger und Umweltfaktor, S. 121–136, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1993.
- Whittaker, B.N.; Reddish, D.J.: Subsidence – occurrence, prediction and control. Elsevier, Amsterdam u. a., 1989.

Anschrift der Autoren

Dr. Stefan Harnischmacher

Universität Koblenz-Landau, Campus Koblenz

Institut für Integrierte Naturwissenschaften, Abteilung Geographie

Universitätsstraße 1, 56070 Koblenz

harnisch@uni-koblenz.de

Prof. Dr. Harald Zepp

Ruhr-Universität Bochum

Geographisches Institut

Universitätsstraße 150, 44780 Bochum

harald.zepp@rub.de