

Bergbaubedingte Höhenänderungen im Ruhrgebiet

Stefan Harnischmacher (1), Harald Zepp (2)

1) Fachbereich Geographie, Philipps-Universität Marburg

2) Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum

Zusammenfassung:

Auf Basis einer Digitalisierung von Höheninformationen in Karten der Preußischen Landesaufnahme (1892) und ihres Vergleichs mit aktuellen digitalen Geländemodellen konnten GIS-gestützt flächendeckend bergbaubedingte Höhenänderungen im Ruhrgebiet detektiert werden. Die größten Senkungen mit -25m treten im Bereich der zentralen Emscherniederung auf.

1. Anlass und Zielsetzung

Bergsenkungen als Folge der unterirdischen Gewinnung von Steinkohle im Tiefbau sind im Ruhrgebiet spätestens seit Mitte des 19. Jahrhunderts bekannt, nachdem im Jahr 1855 erste Klagen über Bergschäden im Essener Raum laut wurden. Sie betrafen zunächst nur die Austrocknung von Brunnen, und wenig später waren bereits 1000 Gebäude und auch die Fabrikanlagen der Kruppschen Gussstahlfabrik reparaturbedürftig (BLEIDICK 1999). Zur Festlegung der Schadensumfänge begannen vor allem die Eisenbahngesellschaften ab 1860 mit umfangreichen Höhenmessungen. Kurz darauf folgten auch die Haus- und Grundbesitzer, so dass zu Beginn der 1880er Jahre bereits ein Großteil des Ruhrgebiets vermessen war. Im Emscherraum

wurden zu diesem Zeitpunkt zwischen Herne und Gelsenkirchen schon Senkungen von bis zu fünf Metern festgestellt. Mit Voranschreiten des Bergbaus nach Norden und Intensivierung des Abbaus in immer größeren Tiefen (BOLDT & GELHAR 2008) sind laut vereinzelten Quellen flächendeckend Gebiete um mehr als 10m abgesunken und in manchen Teilen des Ruhrgebiets maximale Senkungsbeträge von bis zu 24m beobachtet worden (MEYER 1986, MEYER 2002).

Während die Folgen der Bergsenkungen für Gebäude, Fabrikanlagen, Verkehrswege und Versorgungsleitungen grundsätzlich reparabel waren, erfuhren die Vorfluterverhältnisse im Einzugsgebiet der

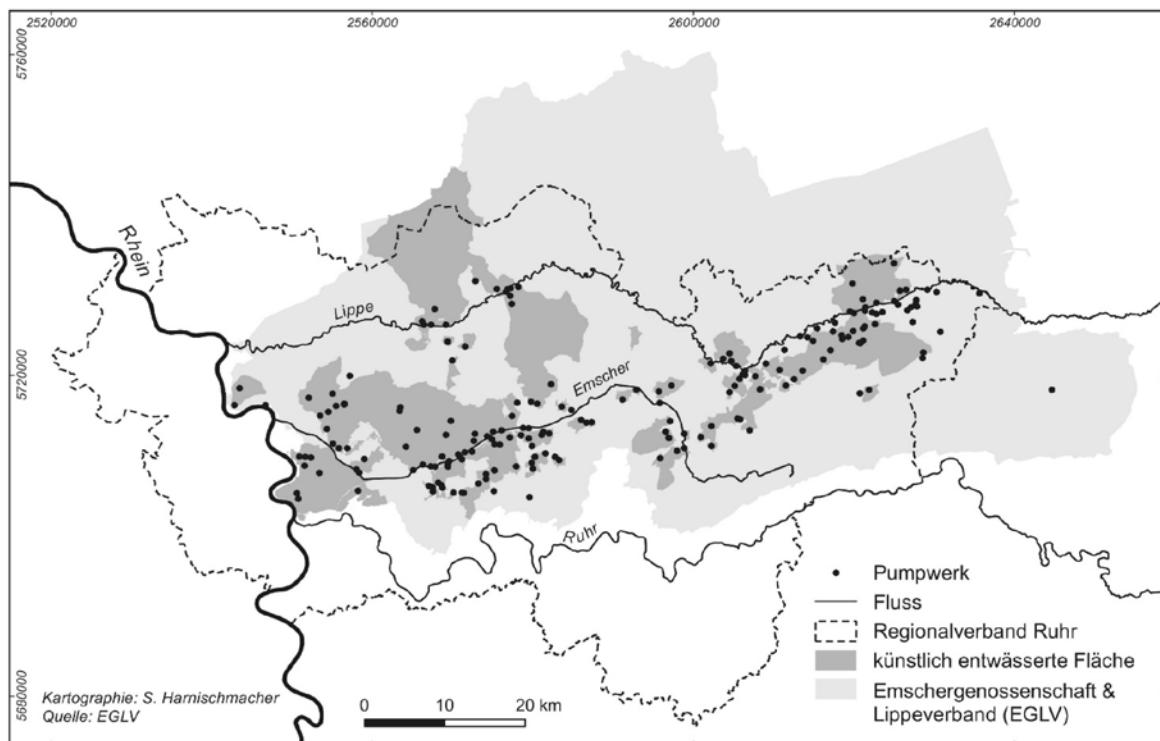


Abb. 1: Pumpwerke und künstlich entwässerte Flächen im Ruhrgebiet

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 & 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 betreiben Emschergenossenschaft und Lippeverband heute mehr als 200 Pumpwerke, die 38% des Emschergenossenschafts- und 15% des Lippeverbandsgebiets künstlich entwässern (Abb.1) und jährlich 608 Millionen Kubikmeter Wasser pumpen (EMSCHERGENOSSENSCHAFT UND LIPPEVERBAND 2008).

Würden die Pumpwerke abgeschaltet oder ausfallen, stünde ein Teil des Ruhrgebiets unter Wasser. Welche dramatischen Folgen der Teilausfall eines Pumpwerks haben kann, geriet schlagartig in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit, als am 26. Juli 2008 im Dortmunder Stadtteil Marten innerhalb von 3 Stunden bis zu 200 mm Niederschlag registriert wurden, eine Menge, die das Zweifache des mittleren Juli-Monatsniederschlages übertrifft (GRÜNEWALD ET AL. 2009). Dies hatte in Dortmund-Dorstfeld zur Folge, dass die Emscher über die Ufer trat, ein Pumpwerk am Oespeler Bach in Dortmund-Marten überflutet wurde und zwei von drei Hochwassermaschinen ausfielen. Große Ge-

biete der beiden Stadtteile standen unter Wasser. Dieses Ereignis machte den Menschen im Ruhrgebiet bewusst, dass nur aufgrund des dauerhaften Betriebs der Pumpwerke die Besiedlung einer durch den Bergbau erheblich veränderten Landschaft möglich ist. Pumpwerke und die künstliche Entwässerung von Bergsenkungsgebieten bilden eine Dauerlast, die auch nach Abwanderung des Bergbaus und Stilllegung der letzten Zechen zu bewältigen ist, solange Menschen im Ruhrgebiet leben.

Die beschriebenen irreversiblen Veränderungen des Reliefs im Ruhrgebiet als Folgen des Steinkohlenbergbaus sind nur ein Beispiel für den Forschungsgegenstand einer Teildisziplin der Geomorphologie, der sog. Anthropogeomorphologie, die sich mit den Einwirkungen des Menschen auf die Erdoberfläche beschäftigt. Bergsenkungen als anthropogeomorphologisches Phänomen sind in der geographischen Fachliteratur zumeist qualitativ mit ihren Folgen beschrieben, jedoch weder systematisch noch flächendeckend und nur selten mit der Angabe belastbarer Senkungsbeträge, etwa am Beispiel einzelner Bergbauregionen, erforscht. So sind auch zu Bergsenkungen im Ruhrgebiet lediglich vereinzelt Zahlen zu maximalen oder mittleren Senkungsbeträgen in unterschiedlichen Raumaußchnitten zu finden. Daraufhin entstand in Kooperation mit der Bezirksregierung Köln (Abteilung 07: Geobasis.nrw) die Idee, die frühesten erfassten und veröffentlichten Höheninformationen auf den Messtischblättern der Preußischen Landesaufnahme aus den 1890er Jahren zu nutzen, um sie mit den aktuellen Geländehöhen zu vergleichen. Hierfür sollten großmaßstäbig und systematisch die historischen Höhen mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems erfasst und mit aktuellen Digitalen Geländemodellen (DGM) verschneitten werden, um erstmals flächendeckend für das gesamte Ruhrgebiet Bergsenkungen detektieren und bergbaubedingte Höhendifferenzen quantifizieren zu können.

2. Material und Methoden

Zur systematischen und flächendeckenden Erfassung von Höhendifferenzen im Ruhrgebiet diente ein Vergleich der Höheninformationen (Höhenlinien und -punkte) auf Karten der Preußischen Landesaufnahme mit aktuellen Digitalen Geländemodellen. Während die Daten aktueller Digitaler Geländemodelle überwiegend auf modernen Methoden der Fernerkundung beruhen und eine entsprechend hohe Genauigkeit aufweisen, waren die größten

Fehler in den Höheninformationen der Preußischen Landesaufnahme zu erwarten. Zur Beurteilung der Genauigkeit der historischen Höheninformationen hilft ein Blick auf die Methodik der damaligen Kartenaufnahme.

Die Messtischblätter der Preußischen Landesaufnahme wurden unmittelbar im Gelände aus den Ergebnissen topographischer Vermessungen kar-

tiert. 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 (MEYER 1930, REICHSAMT FÜR LANDESAUFAUFAHME 1923, REICHSAMT FÜR LANDESAUFAUFAHME 1931, SCHULZE 1903). Von einem einzelnen Standpunkt aus wurden im Umkreis von etwa 400 bis 500 m alle Kleinmessungen durchgeführt, die zur Erfassung der topographischen Objekte und des Reliefs erforderlich waren. Der Vermessungshilfe 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 eingestochen wurde. Auf dem Zeichenpapier 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. 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 LANDESAUFAUFAHME 1931, S. 19) auf dem Zeichenpapier ein.

Zur Erfassung des Reliefs wurden durch Einzelpunkte zunächst die Wölbungslinien, also Rücken- und Muldenlinien (das sogenannte „Geripp“) eingemessen und mit ihrer Höhe auf dem Kartenblatt eingetragen (KOPPE 1900). Anschließend galt es, die Schnittpunkte solcher Höhenlinien mit den Wölbungslinien zu markieren, die möglichst nahe weiterer, mit der Kippregel aufgenommener Höhenpunkte verliefen (REICHSAMT FÜR LANDESAUFAUFAHME 1923). Danach trug der Topograph unter Berücksichtigung des jeweiligen Böschungsgrades entlang der Wölbungslinien die Einteilungsstriche zusätzlicher Höhenlinien ein und verband sie schließlich unter dem Eindruck der Reliefverhältnisse per Hand zu Höhenlinien. 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 LANDESAUFAUFAHME 1931, S. 20).

Die Beurteilung von Fehlern der Höhenlinien und -punkte auf den Karten der Preußischen Landesaufnahme machte eigene Untersuchungen auf insgesamt sechs Kartenblättern der Preußischen Landesaufnahme erforderlich, deren Aufnahme

zwischen den Jahren 1894 und 1906 erfolgte und die außerhalb des bergbaubeeinflussten Ruhrgebiets liegen. Damit war es möglich, unter der Annahme unveränderter Höhenverhältnisse seit Aufnahmezeitpunkt die durch Höhenlinien angezeigten Höhenwerte auf Karten der Preußischen Landesaufnahme mit den aktuellen Höhen, abgeleitet aus dem DGM10, zu vergleichen und abschließend Aussagen zu Höhenlinienfehlern zu treffen. Zur systematischen und reproduzierbaren Erfassung erfolgte in ArcGIS die Digitalisierung von Höhenlinien im Maßstab 1:3.000 entlang von insgesamt sechs Profillinien pro Kartenblatt, die die Kartenblätter in Nord-Süd- und West-Ost-Richtung queren. Jeder Schnittpunkt einer Profillinie mit einer Höhenlinie wurde digitalisiert und mit der jeweiligen Höhenangabe der Höhenlinie versehen. Dann wurde auf Basis des aktuellen DGM10 ein Zellraster mit der Auflösung 10 m berechnet, um nachfolgend zu jedem digitalisierten Punkt seine Höhe auf diesem Zellraster sowie die Geländeneigung an derselben Stelle bestimmen zu können. Schließlich wurde die Höhendifferenz zwischen der Höhenangabe auf den Karten der Preußischen Landesaufnahme und der aktuellen Höhe berechnet und den aus dem DGM10 abgeleiteten Geländeneigungen gegenübergestellt.

Insgesamt gingen in die Auswertung 3.338 digitalisierte Punkte mit einer maximalen Geländeneigung von 25° ein. Nachfolgend wurden die Punkte in Geländeneigungsklassen mit einer Klassenbreite von 1° sortiert und für alle Geländeneigungsklassen eine mittlere absolute Höhendifferenz berechnet. Schließlich konnte die mittlere Geländeneigung (als Tangens) der jeweiligen mittleren absoluten Höhendifferenz einer Klasse gegenübergestellt werden, um als beste Anpassung an die abgebildeten Wertepaare eine nichtlineare asymptotische Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,945 zu identifizieren. Demnach wächst die mittlere absolute Höhendifferenz zwischen den Höhenangaben auf Karten der Preußischen Landesaufnahme und den aus dem DGM10 abgeleiteten aktuellen Geländehöhen asymptotisch mit zunehmender Geländeneigung (α). Als Gesetzmäßigkeit für den mittleren Höhenlinienfehler kann schließlich auf Basis der eigenen Untersuchungen die folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$\pm (9,44 - 8,60 \cdot 0,0954^{\tan \alpha})$$

Die Messtischblätter der Preußischen Landesaufnahme im Ruhrgebiet bildeten die Basis zur digita-

len Erfassung sämtlicher Höhenlinien und -punkte. Insgesamt wurden 22 Kartenblätter der Preußischen Landesaufnahme bearbeitet, die einen Großteil der Fläche des Regionalverbands Ruhrgebiet und des vom Tiefbau in der Steinkohlenförderung betroffenen Areals abdecken. Sie sind im Jahr 1892 aufgenommen und 1894 von der Königlich Preußischen Landesaufnahme herausgegeben worden. Die Kartenblätter wurden von der Bezirksregierung Köln (Abteilung 07, Geobasis.nrw) als Bilddateien im TIF-Format bereitgestellt und anschließend in ArcGIS auf Basis von Gauß-Krüger-Koordinaten georeferenziert.

Nach der Georeferenzierung begann die Digitalisierung aller Höheninformationen auf einem Kartenblatt der Preußischen Landesaufnahme mit Hilfe von ArcGIS. Dazu wurden sämtliche Höhenlinien sowie Höhenpunkte in einzelne Punkt-Shape-Daten überführt. Die Digitalisierung erfolgte am Bildschirm in einem Maßstab von 1:3.000, so dass Lagegenauigkeiten beim Digitalisierungsvorgang minimiert werden konnten. Verteilt man alle digitalisierten Punkte gleichmäßig über die Fläche eines Kartenblatts, 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. Insgesamt wurden auf einer Fläche von 2.828,15 km² 1.175.996 Punkte digitalisiert. Ihr mittlerer Punktabstand beträgt 53,7 m.

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. Als geostatisches Verfahren kam die Kriging-Interpolation zur Anwendung, da es für Daten mit unregelmäßigen Punktabständen besonders geeignet ist und darüber hinaus ein Interpolationsmodell unter Beachtung der spezifischen Reliefeigenschaften bereitstellt (DUTTER 1985). Zur Auswahl eines geeigneten Variogrammmodells wurde über eine sogenannte Kreuzvalidierung das Modell mit den kleinsten Vorhersagefehlern identifiziert. In allen Fällen betrug die sogenannte Nugget-Varianz der Variogrammmodelle Null, da nicht von vornherein eine Fehlertoleranz des digitalisierten Höhenwertes unterstellt werden sollte. Weiterhin wurden Anisotropien berücksichtigt, da insbesondere im südlichen Ruhrgebiet Richtungsabhängigkeiten der Geländehöhen infolge des variskischen Streichens bestehen.

Als Datenquelle für die aktuellen Höhen im Ruhrgebiet diente das aus Laserscannbefliegungen abgeleitete Digitale Geländemodell DGM10. Das

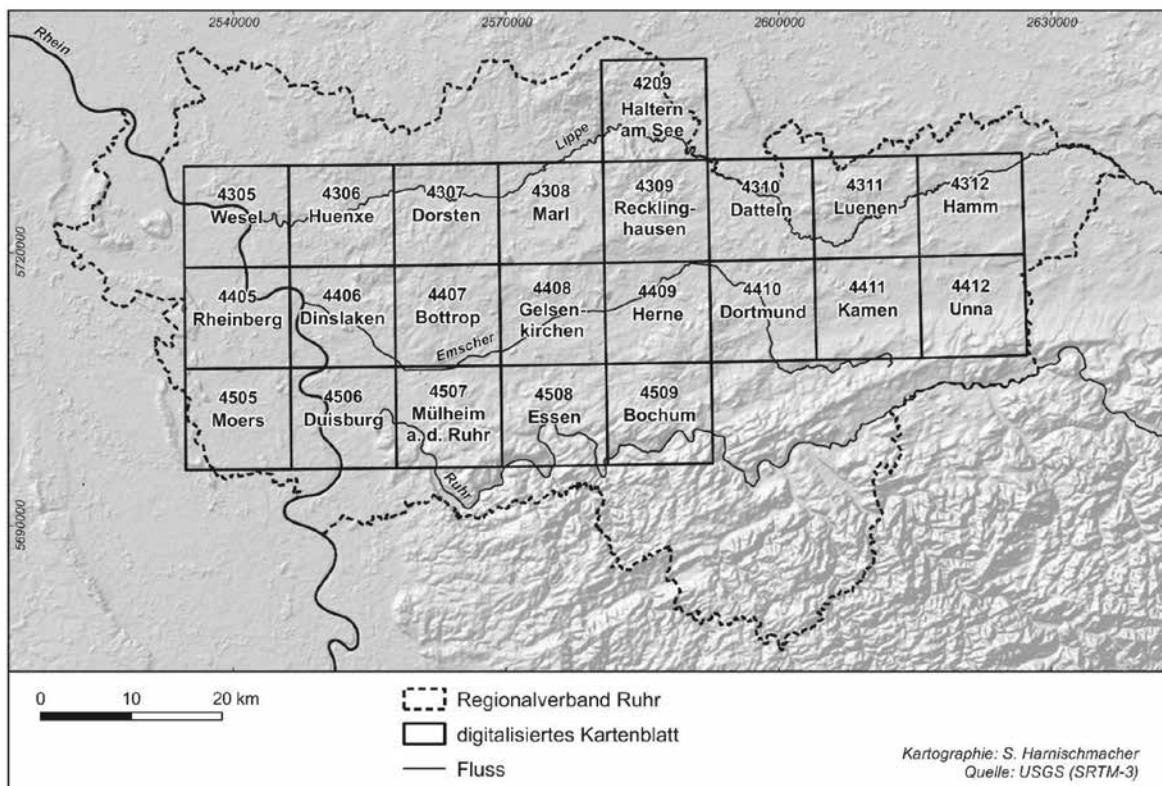


Abb. 2: Übersicht der digitalisierten Kartenblätter

Punktraster des DGM10 wurde ebenso wie die digitalisierten historischen Höhendaten in ArcGIS zu einem Zellraster mit einer Auflösung von 10 m interpoliert.

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 mit der Zellgröße 10 m verschnitten, um Höhenänderungen zwischen dem Jahr 1892 und der heutigen (1996 bis 2007) Geländeoberfläche quantifizieren und lokalisieren zu können. Es entstanden entsprechend des Blattschnittes der TK 25 insgesamt 22 Karten mit den berechneten Höhendifferenzen (Abb. 2).

3. Ergebnisse

3.1 Übersicht

Zunächst sei eine Übersicht der berechneten Höhendifferenzen zwischen dem historischen und aktuellen Geländemodell präsentiert, die aus der Kombination aller 22 bearbeiteten Kartenblätter entstand (Abb. 3; s. HARNISCHMACHER 2012). Alle Geländebereiche, die im Vergleich zur Situation von 1892 tiefer liegen, sind mit negativen Höhendifferenzen in Graustufen abgebildet. Insgesamt fällt eine Häufung großer Flächen mit Höhendifferenzen von -10 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 Dort-

munds und nordöstlich davon zu erkennen. Hierbei fällt auf, dass die beschriebenen Bereiche entlang West-Südwest – Ost-Nordost orientierter Linien verlaufen und offensichtlich der Raumrichtung geologischer Strukturen folgen. Tatsächlich zeigen die Achsen der großen geologischen Hauptmulden im Steinkohlengebirge die gleiche, dem variskischen Streichen entsprechende Orientierung (GRABERT 1998, KUKUK & HAHNE 1962)

Dies legt die Vermutung nahe, dass die identifizierten Flächen mit negativen Höhendifferenzen auf den intensiven Abbau von Steinkohlen 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

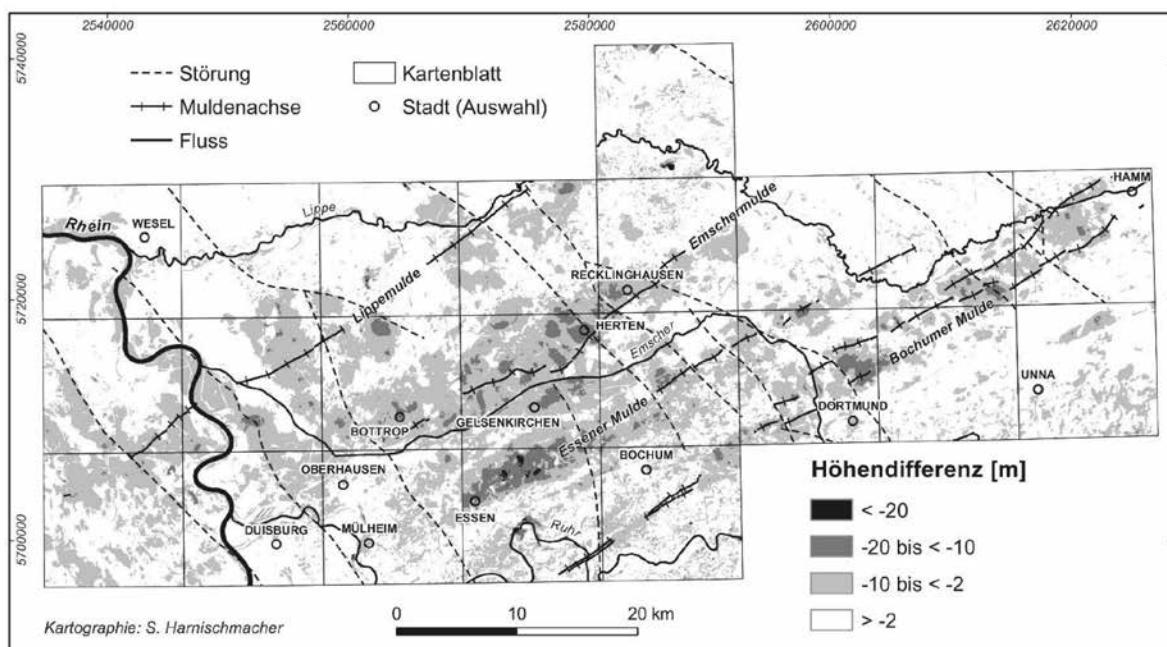


Abb. 3: Übersicht der berechneten Höhendifferenzen

Störungen im Steinkohlengebirge und der Verbreitung von Flächen mit negativen Höhendifferenzen erkennbar. Stellenweise begrenzt eine als Sprung bezeichnete Verwerfung die Verbreitung von Senkungsgebieten, wie etwa im Norden Bottrops, Dortmunds und am Niederrhein. Tatsächlich endet ein Flöz im Steinkohlengebirge häufig an einem Sprung und ist entsprechend des jeweiligen Verwerfungs betrags einer Störung um bis zu mehrere hundert Meter 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. Der Zusammenhang zwischen der Verbreitung von Arealen mit negativen Höhendifferenzen, der Lage von Schachtstandorten und den tektonischen Verhältnissen im Steinkohlengebirge wird anhand der zwei nachfolgenden großmaßstäbigen Beispiele näher betrachtet.

3.2 Beispiel Essen

Am Beispiel des Kartenblatts Essen soll die Aufmerksamkeit auf einen Bereich mit negativen Höhendifferenzen von mehr als -20m nordöstlich des Stadtcores von Essen gerichtet werden. Abb. 4 zeigt den 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 denen Schacht 12 im Jahre 2003 als Weltkulturerbe einen internationalen Bekanntheitsgrad erlangt hat (HUSKE 2006). Zollverein gehört zu den Zechen mit der längsten Abbaugeschichte von seiner Gründung im Jahre 1847 bis zur Stilllegung im Jahre 1986 (HERMANN & HERMANN 2008).

Die lange Abbaugeschichte der Zeche Zollverein sowie ihre kontinuierliche Ausweitung zum großräumigen Verbundbergwerk lassen vermuten, dass die hohen Werte negativer Höhendifferenzen auf den Steinkohlenbergbau zurückzuführen und als

zusammenhängendes Areal von Bergsenkungen zu deuten sind. Der untertägige Abbau erfolgte im Bereich der Essener Mulde, die sich als Hauptmulde im Steinkohlengebirge durch flachlagernde und besonders abbauwürdige Steinkohlenflöze auszeichnet.

Ein Profil durch das Tal des Schwarzbachs bis auf den kleinen Hügel des Mechtenbergs zeigt, dass Höhendifferenzen von bis zu -25m auftreten können und auch Vollformen nicht von Bergsenkungen verschont sind (s. Abb. 5). Bergsenkungen treten entgegen der weit verbreiteten Vorstellung nicht zwangsläufig als morphologische Senken mit den bekannten Begleiterscheinungen wie Bergsenkungsseen oder Vernässungen der Geländeoberfläche in Erscheinung, sondern können großräumig auch Kuppenpositionen erfassen, ohne im Gelände als Senkungsgebiet wahrgenommen zu werden. Die zuvor allgemein beschriebenen flachen Senkungströge, wie sie in Abhängigkeit von Abbauteufe, Grenzwinkel, Senkungsfaktor und Größe der Abbaufäche nach dem Abbau söhlig gelagerter Flöze entstehen, stellen geomorphologische Sonderfälle

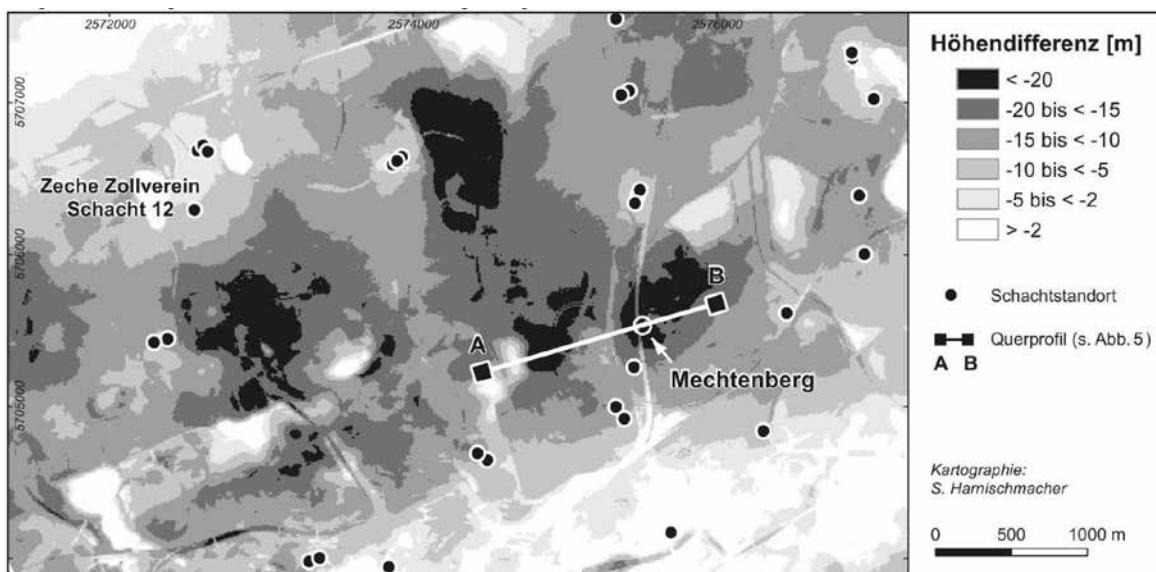


Abb. 4: Ausschnitt des Kartenblattes Essen mit berechneten Höhendifferenzen und Lage von Schachtstandorten.

dar. Die theoretisch beschriebene Morphologie der Senkungströge ist eine Modellvorstellung, unabhängig von der ursprünglichen Geländeform. Nur bei einer im Ausgangszustand völlig horizontalen Geländeoberfläche bilden sich Senkungsmulden, deren Form diesen Modellvorstellungen entspricht.

3.3 Beispiel Gelsenkirchen

Das Kartenblatt Gelsenkirchen befindet sich im Bereich der Emscher-Hauptmulde, die neben der Lippemulde, der Essener sowie der Bochumer Mulde zu den vier großen Hauptmulden des Steinkohlengebirges gehört. Im Süden wird die Emscher-Hauptmulde vom Gelsenkirchener Hauptsattel und im Norden vom Vestischen Hauptsattel begrenzt.

Im Bereich des Gelsenkirchener Hauptsattels verläuft die z. T. mitgefaltete Gelsenkirchener Überschiebung. Aus südöstlicher Richtung greift der Primus-Sprung in das Kartenblatt über und läuft innerhalb der Emscher-Hauptmulde aus. Weiter im Osten folgen noch der Ewald-Hannibal- sowie der Ewald-Sprung als bedeutende, den Faltenbau querende Störungen (DROZDZEWSKI 1980).

Das Verbreitungsmuster der fast flächendeckend detektierten negativen Höhendifferenzen (s. Abb. 6) ist an die Tektonik des Steinkohlengebirges angelehnt. Grundsätzlich orientieren sich die höchsten Werte berechneter negativer Höhendifferenzen

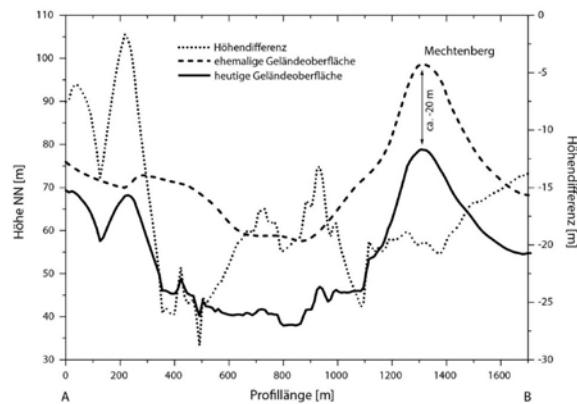


Abb. 5: Querprofil (A-B) in einem Ausschnitt des Kartenblattes Essen

entlang der Emscher-Hauptmulde und werden südlich davon, bei steil stehenden Flözen und im Einflussbereich einer Überschiebungstektonik der Gelsenkirchener Überschiebung, deutlich geringer. Darüber hinaus sind vergleichsweise geringe Beträge negativer Höhendifferenzen entlang der genannten Sprünge festzustellen. Insgesamt können die berechneten negativen Höhendifferenzen als Bergsenkungen gedeutet werden, die offensichtlich Folge einer intensiven Steinkohlenförderung aus den Bochumer und Essener Schichten innerhalb des breiten Trog der Emscher-Hauptmulde sind.

Wendet man die eigene nichtlineare Beziehung zur Abschätzung des mittleren Höhenlinienfehlers auf Karten der Preußischen Landesaufnahme (s. Gl. 1) zusammen mit einem mittleren Höhenfehler des

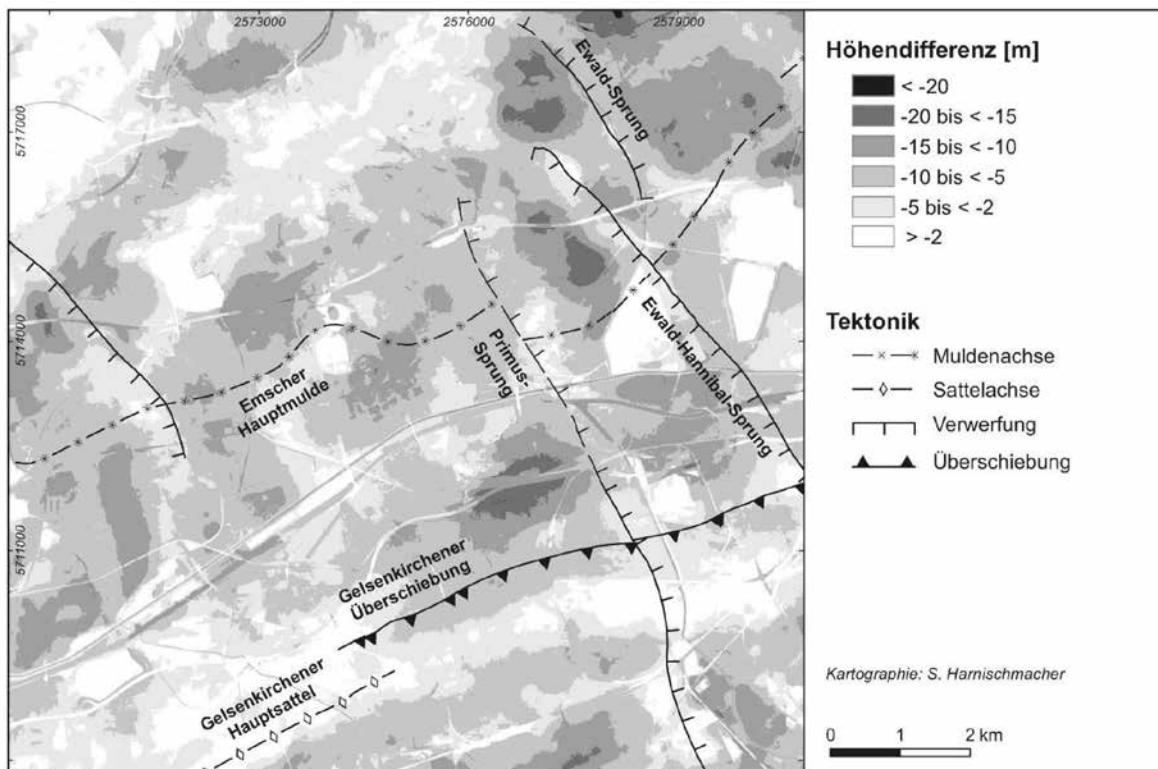


Abb. 6: Kartenblatt Gelsenkirchen mit berechneten Höhendifferenzen und Tektonik

Digitalen Geländemodells DGM10 von ffl 0,5 m am Beispiel des Kartenblatts Gelsenkirchen an, resultieren die folgenden Ergebnisse. Auf einem Großteil des Kartenblatts (86%) sind für die berechneten Höhendifferenzen Fehler von lediglich ffl 1m bis ffl 2m zu beachten; auf 12,4% der Fläche entfallen sogar noch geringere Fehler von weniger als ffl 1m

(Abb. 7). Höhenfehler von mehr ffl 2m stellen die Ausnahme dar. Die Neigungsverhältnisse auf dem Kartenblatt Gelsenkirchen sind typisch für einen Großteil des Ruhrgebiets, so dass auf fast allen Flächen ähnliche Höhenfehler berechnet werden können.

4. Diskussion

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Fehler, die auf die Qualität der Primärdaten sowie die Güte der Georeferenzierung und Digitalisierung zurückzuführen sind, mit zunehmender Geländeneigung anwachsen. Damit treten insbesondere in den südlichen Arealen des Ruhrgebiets mit ihren Anteilen am Süderbergland, den zahlreichen Eggen, steilwändigen Kerb- und Kerbsohlentälern sowie den Hängen im Ruhtal relativ große Höhenfehler auf. Der überwiegende Teil des vom Tiefbau im Steinkohlenbergbau betroffenen Anteils des Ruhrgebiets, zumeist am Südrand der Münsterländer Tieflandsbucht liegend, etwa entlang der Hellwegzone sowie des Emscher- und Lippetals, zeigt eine deutlich andere Reliefcharakteristik mit Geländeneigungen von weit unter 5°. Nur vereinzelt, etwa an den Schichtstufen der ausstreichenden Oberen Kreide, sind größere Geländeneigungen zu beobachten. Am Beispiel des Kartenblatts Gelsenkirchen kann aufgezeigt werden, dass unter Berücksichtigung der eigenen Un-

tersuchungen zu Höhenlinienfehlern auf Karten der Preußischen Landesaufnahme überwiegend Fehler von deutlich weniger als ffl 2m und nur vereinzelt größere Werte anzunehmen sind.

Ein Vergleich mit den wenigen in der Literatur zu findenden Angaben über Bergsenkungen im Ruhrgebiet bestätigt die Richtigkeit der Größenordnung eigener Berechnungsergebnisse: So kann die von BELL ET AL. (2000), MEYER (2002), JACOBI ET AL. (1992) oder HELD & HERGET (2005) immer wieder genannte Zahl von 24m für Bergsenkungen zumindest anhand des beschriebenen Beispiels aus Essen nahe der Zeche Zollverein mit eigenen Berechnungen nachvollzogen werden.

Interessant erscheint ein Vergleich der für das Untersuchungsgebiet berechneten Volumenzuwächse und -verluste mit Angaben zu den bislang geförderten Gesteinsvolumina im Ruhrgebiet. Neu-

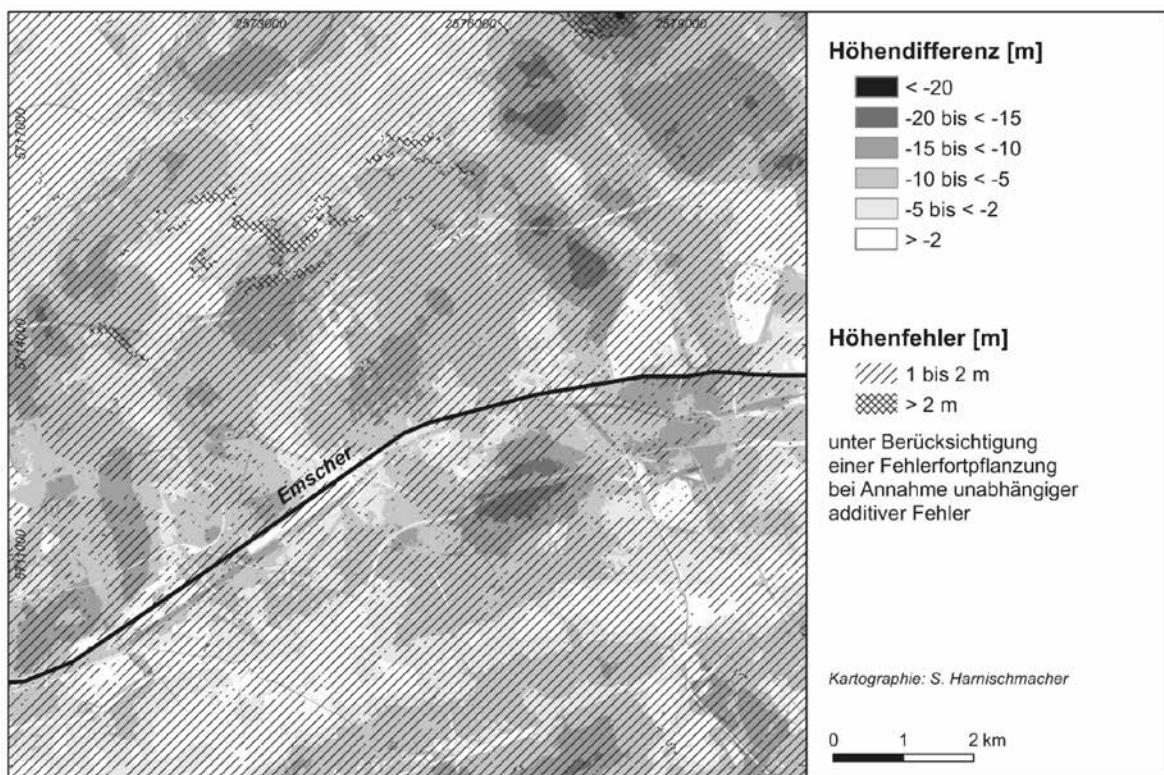


Abb. 7: Kartenblatt Gelsenkirchen mit berechneten Höhendifferenzen und Höhenfehlern

esten Angaben von MEYER (2002) zufolge ist im Ruhrgebiet in einem Zeitraum von 1800 bis 2000 ein untertägiges Volumendefizit von rund 10 km^3 geschaffen worden. Als Senkungsvolumen nennt MEYER (2002) unter Berücksichtigung eines mittleren Senkungsfaktors eine Zahl von 8 km^3 . Der im Rahmen dieser Arbeit berechnete Volumenverlust nach Vergleich der historischen Geländeoberfläche des Jahres 1892 mit dem heutigen Relief beläuft sich auf rund 6 km^3 . Die Differenz von etwa 2 km^3 ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der auf Basis eigener Untersuchungen berechnete Volumenverlust auf einem Vergleich zweier Geländeoberflächen basiert und folglich in einer als Verlustgebiet gekennzeichneten Fläche durchaus Aufschüttungen enthalten sein können. Damit wird der ausschließlich bergsenkungsbedingte Volumenverlust z. T. kompensiert. Zuletzt ist zu beachten: Der eigenen Untersuchung lag eine historische Geländeoberfläche zugrunde, die im Jahr 1892 aufgenommen wurde und somit etwa 50 Jahre Tiefbau im zentralen Ruhrgebiet mit all seinen Folgen für die Tagesoberfläche unberücksichtigt bleiben mussten. Wie in der Einleitung beschrieben, waren in den 1880er Jahren zwischen Herne und Gelsenkirchen schon Senkungen von bis zu fünf Metern festgestellt worden. Aus den gleichen Gründen mag auch der Unterschied zwischen dem von MEYER (2002) angegebenem effektiven Volumendefizit von 6 bis 7 km^3 und einem im beschriebenen

Projekt berechneten Nettovolumenverlust von $-4,4\text{ km}^3$ zu erklären sein. Ähnliches gilt für die nach den Angaben MEYERs (2002) berechnete mittlere Senkung von $3,3\text{ m}$ für die Fläche aller Grubenfelder der Ruhrkohle AG (1988: 3.044 km^2), die auch in der Arbeit von GRÜN (2000) genannt wird (3 m): Eine eigene, aus dem Volumenverlust und der Gesamtfläche, berechnete mittlere Höhendifferenz von $-2,2\text{ m}$ ist kleiner. Bezieht man jedoch den berechneten Volumenverlust auf nur solche Flächen, die im Vergleich zur Geländeoberfläche des Jahres 1892 tiefer liegen, kann eine mittlere Höhendifferenz von $-3,0\text{ m}$ angegeben werden, die offensichtlich mit den Angaben MEYERs (2002) und GRÜNs (2000) vergleichbar ist.

Insgesamt belegen diese Vergleiche, dass unter Beachtung möglicher Ursachen für Unterschiede in den Ergebnissen durchaus ähnliche Größenordnungen verzeichnet werden können und somit die beschriebene Methodik zu belastbaren Werten führt. Besonders zu beachten ist das Jahr 1892 als Datum einer Referenzoberfläche, mit der die aktuellen Geländehöhen verglichen wurden. Dies sowie die Kompensierung mancher Senkung durch künstliche Aufschüttungen kann als Erklärung dafür dienen, dass die in der Literatur genannten Beträge zu Volumendefiziten, mittleren Senkungen oder maximalen Bergsenkungen im Ruhrgebiet die eigens berechneten Werte geringfügig übertreffen.

5. Fazit

Die Beispiele zu den Kartenblättern Essen und Gelsenkirchen zeigen, dass entlang der großen Hauptmulden des Steinkohlengebirges Höhendifferenzen von bis -25 m berechnet werden können und Werte von -10 bis -20 m für das vom Steinkohlenabbau betroffene Ruhrgebiet keine Seltenheit sind (s. Abb. 8).

Die Höhendifferenzen sind aufgrund der Lage naher Schachtstandorte sowie der tektonischen Verhältnisse im Steinkohlengebirge eindeutig als Bergsenkungen zu identifizieren. Eine Volumenbilanzierung auf Grundlage der historischen und aktuellen Geländeoberfläche lässt die Berechnung einer mittleren Nettohöhendifferenz von mehr als -5 m für das Kartenblatt Gelsenkirchen zu. Hier sind bereits alle Aufschüttungen, wie Bergehalden oder Mülldeponien, berücksichtigt. Für das gesamte Untersuchungsgebiet mit mehr als 2.800 km^2 Fläche beträgt die mittlere Nettohöhendifferenz $-1,6\text{ m}$. Das vorgestellte Forschungsprojekt leistet mit der Quantifizierung des anthropogenen, bergbaube-

dingten Einflusses auf das Relief am Beispiel des Ruhrgebiets einen Beitrag zu der im deutschsprachigen Raum kaum beachteten Forschungsdisziplin der Anthropogeomorphologie. Die Erforschung und Quantifizierung von Bergsenkungen aus Sicht der Geographie fand hier bisher nicht statt, so dass eine in den forschungsstrategischen und programmativen Leitlinien des Deutschen Arbeitskreis für Geomorphologie (DIKAU ET AL. 2006) erkannte Forschungslücke geschlossen werden konnte.

Gerade in industriell stark überprägten Regionen wie dem Ruhrgebiet hat der Mensch den präsentierten Ergebnissen zufolge einen entscheidenden Anteil an den beobachteten Reliefveränderungen und stellt hier ein nicht länger zu ignorierendes Agens der Reliefformung dar. Ähnlich wie auch HAFF (2003) den Charakter anthropogener Reliefformung kennzeichnet konnte am Beispiel des Ruhrgebiets aufgezeigt werden, dass die anthropogenen reliefwirksamen Prozesse in vergleichsweise



Abb. 8: Bergsenkungsmulde entlang der Münsterstraße in Gelsenkirchen. Im Vergleich zum Jahr 1892 hat sich das ursprünglich ebene Gelände um mindestens 19 m abgesenkt (eigene Aufnahme)

kurzen Zeiträumen ablaufen. Daneben ist die Konzentration menschlicher Aktivität auf kleine Areale auch für das Ruhrgebiet charakteristisch, wenn die anthropogene Reliefformung mit fast ubiquitär wirkenden natürlichen Prozessagentien wie etwa Wasser oder Wind verglichen wird.

Insgesamt zeichnen sich übereinstimmend mit NIR (1983) die Eingriffe des Menschen in das Relief durch vergleichsweise hohe Intensitäten und Prozessraten aus. Dies unterscheidet in der Regel anthropogene Reliefformung grundsätzlich vom natürlichen Prozessgeschehen. Legt man etwa die für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnete mittlere Nettohöhendifferenz von -1,6 m zugrunde und bezieht sie auf den Beobachtungszeitraum von 115 Jahren (1892 bis 2007), kann eine mittlere Rate der Höhenänderung von -13,9 mm pro Jahr berechnet werden. Auch wenn diese Zahl ein lediglich statistisch berechneter Mittelwert ist und die realen Prozessgeschwindigkeiten aufgrund ihrer räumlichen und zeitlichen Heterogenität nur ansatzweise widergespiegelt werden, so vermittelt sie doch eine Vorstellung von der Intensität anthropogener Reliefformung, vergleicht man sie mit den Prozessraten natürlicher Reliefformung: ANDERSON & ANDERSON (2010) etwa beschreiben in ihrem jüngst erschienenen Lehrbuch zur Geomorphologie die Denudationsraten der bedeutendsten Flüsse der Erde und beziffern die mittlere Denudationsrate aller aufgelisteten Flüsse mit 0,129 mm pro Jahr (ANDERSON & ANDERSON 2010, S. 165 ff). Die oben genannte mittlere Rate von Höhenänderun-

gen im Ruhrgebiet übertrifft diesen Wert um mehr als das Hundertfache. Grundsätzlich bestätigt der Vergleich – ähnlich wie von HAFF (2003) beschrieben – eine unter dem Einfluss des Menschen in der Erdgeschichte niemals zuvor erreichte Prozessgeschwindigkeit der Reliefformung. Im Kontext der unter Geowissenschaftlern jüngst aufkeimenden Diskussion um die Einführung eines neuen Erdzeitalters namens „Anthropozän“ wird daher nicht ohne Grund der Mensch als bedeutendstes Agens der Reliefformung bezeichnet (PRICE ET AL. 2011).

Auch wenn die Bergsenkungen im Ruhrgebiet im Allgemeinen als irreversibel bezeichnet werden und im Einflussbereich der zwei noch aktiven Bergwerke Prosper-Haniel und Auguste-Victoria in naher Zukunft mit weiteren Senkungen zu rechnen ist, so könnten schon bald Geländehebungen einen Teil der Senkungen kompensieren und erneute Bewegungen an der Geländeoberfläche zu Schäden der Infrastruktur führen. Im Zuge der Stilllegung von Zechen im Ruhrgebiet wird auch dauerhaft die Hebung von Grubenwasser erforderlich sein. Die zukünftige Wasserhaltung soll jedoch – auch zur Einsparung von Kosten bei Bewältigung der Ewigkeitslasten des Bergbaus – reduziert werden, so dass nach Ende des Bergbaus im Ruhrgebiet im Jahre 2018 zumindest eine Teilflutung der Grubengebäude vorgesehen ist (FISCHER 2006). In einigen der stillgelegten Bergwerke wie etwa Lippe oder Niederberg hat die Flutung bereits begonnen (HAGER 2010). Als Konsequenz der Flutung sind Geländehebungen zu erwarten, die mit aufwän-

digen Untersuchungen gemessen (BAGLIKOW 2006, ROSNER ET AL. 2006) und simuliert werden (SROKA ET AL. 2006). Durch die Hebungen wird ein Teil der früheren Senkungen kompensiert. Auch die abbaubedingten Bergschäden werden partiell zurückgebildet oder abgemildert, zugleich sind jedoch auch neue Bergschäden zu erwarten. Dabei liegt der Fokus aktueller Untersuchungen auf der möglichen Reaktivierung von Unstetigkeiten – wie den am Rande einer Senkungsmulde auftretenden

Erdstufen – oder aber von Verwerfungen im Steinkohlengebirge. Wenn auch nach den bisherigen Erfahrungen die Hebungen nur mit einer Geschwindigkeit von nicht mehr als einigen Zentimetern pro Jahr ablaufen (zum Vergleich: Abbaubedingte Senkungen erreichten Maximalwerte von 2-3 cm pro Tag!), ist aufgrund der zu erwartenden langen Flutungsdauer von einem hohen Schadenspotenzial auszugehen (HAGER 2010).

6. Literaturverzeichnis

Bell, F.G.; Stacey, T.R.; Genske, D.D.: Mining subsidence and its effect on the environment, some differing examples. *Environmental Geology* 40. 1-2. S. 135-152: 2000

Bleidick, D.: Wirtschaft und Umwelt im Emscherraum im 19. Jahrhundert. 100 Jahre Wasserwirtschaft im Revier. Die Emschergenossenschaft S. 22-32: 1999

Boldt, K.-W.; M. Gelhar, M.: Das Ruhrgebiet. Landschaft, Industrie, Kultur. : Darmstadt, 2008

Dikau, R.; Moldenhauer, K.-M.; Bedehäsing, J.: Die Erdoberfläche, Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen. Forschungsstrategische und programatische Leitlinien zukünftiger geomorphologischer Forschung und Lehre. : Berlin, Stuttgart, 2006

Donnelly, L.J.; Culshaw, M.G.; Bell, F.G.: Longwall mining-induced fault reactivation and delayed subsidence ground movement in British coalfields. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 41. S. 301-314: 2008

Drozdzewski, G.: Tiefen tektonik der Emscher- und Essener Hauptmulde. Beiträge zur Tiefen tektonik des Ruhrkarbons S. 45-83: Krefeld, 1980

Dutter, R.: Geostatistik, Eine Einführung mit Anwendungen. Mathematische Methoden in der Technik2.: Stuttgart, 1985

Emscher Genossenschaft Und Lippe Verband: Wo nichts mehr fließt, hilft nur noch pumpen, Pumpwerke. Schrittmacher der Wasserwirtschaft: Essen, 2008

Fischer, P.: Wasserhaltung Ruhr im Rahmen der Anpassung der Förderkapazität unter technischen

und Kostenaspekten. 8. Aachener Altlasten- und Bergschadenkundliches Kolloquium S.51-55: Clausthal-Zellerfeld, 2006

Grün, E. : Bergschadensregulierung, zwischen Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit. 1. Aachener Bergschadenkundliches Kolloquium. S. 11-21: Aachen, 2000

Grünwald, U.; Schümberg, S.; Wölcke, B.; Graf Van Riesenbeck, G.; Piroth, K.: Gutachten zu Entstehung und Verlauf des extremen Niederschlag-Abfluss-Ereignisses am 26.07.2008 im Stadtgebiet von Dortmund - einschließlich der Untersuchung der Funktionsfähigkeit von wasserwirtschaftlichen Anlagen und Einrichtungen der Stadt, Emscher Genossenschaft und Dritter in den Gebieten Dortmund-Marten, Dortmund-Dorstfeld und Dortmund-Schönau. Cottbus, Karlsruhe, Köln. : 2009

Haff, P.K.: Neogeomorphology, Prediction, and the Anthropic Landscape. *Prediction in geomorphology* S. 15-26: Washington, D.C, 2003

Hager, S.: Stand der Aktivitäten der RAG Aktiengesellschaft bei der Untersuchung möglicher flutungsinduzierter Bodenbewegungen. 11. Geokinematischer Tag des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie S. 133-145 : Essen, 2010

Harnischmacher, S.: Bergsenkungen im Ruhrgebiet, Ausmaß und Bilanzierung anthropogeomorphologischer Reliefveränderungen. *Forschungen zur deutschen Landeskunde* 261. : Leipzig, 2012

Held, T.; Herget, J.: Umgestaltung von Flüssen. Emscher und Lippe als Beispiel. *Geographie und Schule* 27158. S. 12-19: 2005

Hermann, W.; Hermann; G.: Die alten Zechen an der

- Ruhr. : Königsstein im Taunus, 2008
- Huske, J. : Die Steinkohlenzechen im Ruhrrevier, Daten und Fakten von den Anfängen bis 2005. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum144. : 2006
- Jacobi, H.; Grün, E.; Hofmann; W.: Aufgaben des Umweltmanagements im Steinkohlenbergbau. Glückauf128. 4. S. 249-258: 1992
- Koppe, C.: Die neuere Landes-Topographie, die Eisenbahn-Vorarbeiten und der Doctor-Ingenieur: Braunschweig, 1900
- Kratzsch, H.: Bergschadenkunde: Bochum, 2008
- Meyer, D.E.: Massenverlagerung durch Rohstoffgewinnung und ihre umweltgeologischen Folgen. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 137. S. 177-193: 1986
- Meyer, D.E. : Geofaktor Mensch. Essener Unikate19. S. 9-25: 2002
- Meyer, H.H.F.: Die amtlichen Kartenwerke des Reichsamts für Landesaufnahme. Die Naturwissenschaften 18. 9. S. 193-204: 1930
- Nir, D.: Man, a Geomorphological Agent, An Introduction to Anthropic Geomorphology. : 1983
- Peters, R.: Die Erhaltung der Vorflut, 100 Jahre Wasserswirtschaft im Revier. Die Emscher Genossenschaft 1899-1999. S. 52-62: Bottrop, Essen, 1999
- Pollmann, H.J.; Wilke, F.L.: Der untertägige Steinkohlenbergbau und seine Auswirkungen auf die Tagesoberfläche. (Bochumer Beiträge zum Berg- und Energierecht18. 2. : Stuttgart, 1994
- Price, S.J.; Ford, J.R.; Cooper, A.H.; Neal, C.: Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene. The significance of artificial ground in Great Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society Band A. 369. S. 1056-1084: 2011
- Rathke, K.: Hydrologisch-hydrogeologische Beeinträchtigungen. Steinkohlenbergbau – Steinkohle als Grundstoff, Energieträger und Umweltfaktor S. 136-148: Berlin, 1993
- Reichsamt Für Landesaufnahme : Das topographische Aufnehmen. Vorschrift für die Topographische Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme 1.: Berlin, 1923
- Reichsamt Für Landesaufnahme: Das Reichamt für Landesaufnahme und seine Kartenwerke. : Berlin, 1931
- Reuther, E.-U.: . Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus 1.: Essen, 1989
- Rosner, P.; Heitfeld, M.; Schetelig, K.; Sahl; H.: Monitoring des Grubenwasseranstiegs im Aachener Steinkohlenrevier. S. 23-36: 2006
- Schulze, B.: . Das militärische Aufnehmen unter besonderer Berücksichtigung der Arbeiten der königlich preußischen Landesaufnahme nebst einigen Notizen über Photogrammetrie und über die topographischen Arbeiten Deutschland benachbarter Staaten: Leipzig, Berlin, 1903
- Sroka, A.; Preusse, A.; Holzheim, M.: Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs auf die Tagesoberfläche. Stand der Forschung. 8. Aachener Altlasten- und Bergschadenkundliches Kolloquium S. 57-68 : Clausthal-Zellerfeld, 2006
- Steinberg, H.G. : Die Entwicklung des Ruhrgebietes von 1840-1982. Spieker32. S. 19-36: 1988
- Szelag, S.; Weber, U.: Bergsenkung. Steinkohlenbergbau – Steinkohle als Grundstoff, Energieträger und Umweltfaktor S. 121-136 : Berlin, 1993
- Whittaker, B.N.; Reddish, D.J.: Subsidence - occurrence, prediction and control. : Amsterdam, 1989