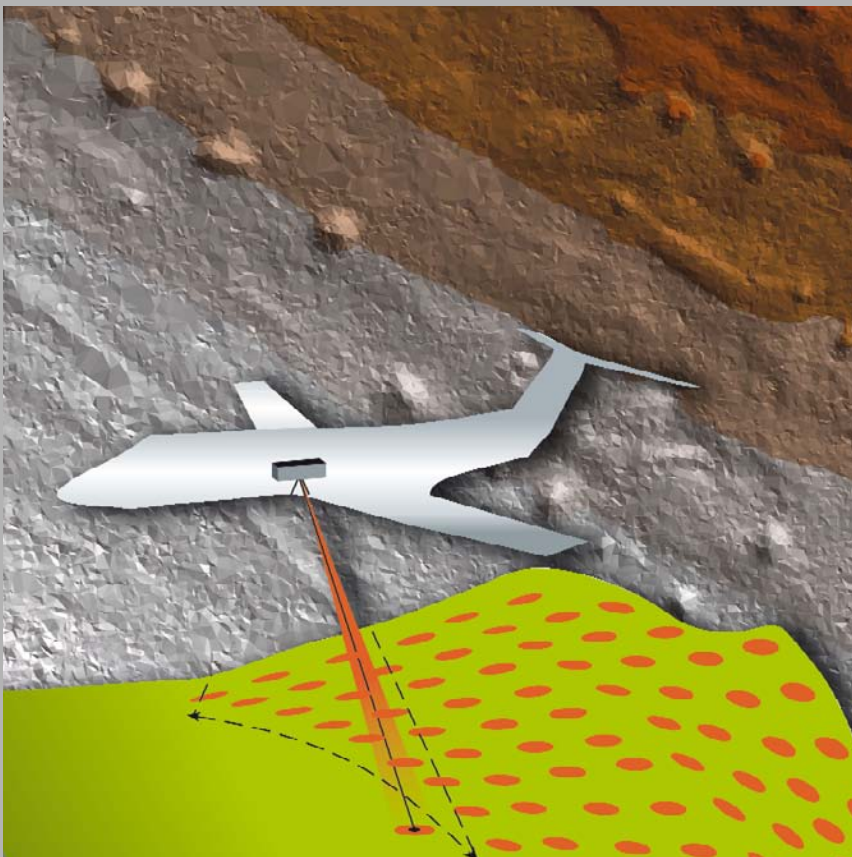


Airborne Laserscanning als ergänzende Erkundungs- methodik von bergbau- bedingten Kleinformen im Bochumer Süden (Ruhrgebiet)

Von Till Florian Klöckner



Airborne Laserscanning als ergänzende Erkundungs- methodik von bergbau- bedingten Kleinformen im Bochumer Süden (Ruhrgebiet)

VonTill Florian Klöckner

(M. Sc. Physische Geographie an der Philipps-Universität Marburg)

Kontakt zum Autor:
te.kloeckner@mailbox.org

Inhalt

1	Einführung	5
2	Geologische Entwicklung und bergbauliche Nutzung des Untersuchungsgebietes	8
3	Theoretische Aspekte	12
3.1	Formenkatalog bergbaubedingter Hohl- und Vollformen	12
3.1.1	Kohlengräberlöcher (= Pingen), Kohlengräben	12
3.1.2	Halden	13
3.1.3	Tagesbrüche	13
3.2	Airborne Laserscanning und dessen Anwendung im Bereich digitaler Reliefanalysen	18
3.3	Datengrundlage	19
4	Methodik	19
4.1	Das Untersuchungsgebiet	21
4.2	Vorbereitende Arbeitsschritte	21
4.2.1	Prozessierung des digitalen Geländemodells	21
4.2.2	Bereinigung des Datensatzes	22
4.3	Computergestützte Detektion bergbaubedingter Hohlformen im digitalen Geländemodell	23
4.3.1	Hohlformdetektion mittels Senkenfüllung im digitalen Geländemodell	23
4.3.2	Abgrenzung wahrer von falschen Senken	24
4.4	Computergestützte Detektion bergbaubedingter Vollformen im digitalen Geländemodell	26
4.4.1	Vollformdetektion mittels Senkenfüllung im invertierten digitalen Geländemodell	26
4.4.2	Vollformdetektion mittels Abflussakkumulationsberechnung	26
4.5	GIS-gestützte visuelle Analyse des digitalen Geländemodells hinsichtlich bergbaubedingter Hohl- und Vollformen	27
5	Ergebnisse	30
6	Validierung der Ergebnisse	34
7	Diskussion und Ausblick	39
7.1	Eignung der Identifikations- und Validierungsmethoden	39
7.1.1	Abflusslose Senken (Füllmethode)/0-Akkumulationsflächen	39
7.1.2	Schwellenwert	40
7.1.3	Geländebegehung/Visuelle DGM-Analyse	41
7.1.4	Kartenmaterial	42
7.1.5	Bergbauwanderführer	42
7.2	Verbesserungsmöglichkeiten	42
7.3	Fazit	43
8	Schlusswort	44
9	Literaturverzeichnis	45
10	Kartographische Grundlagendaten	48
	Impressum	48

Kurzfassung:

LiDAR-Daten (LiDAR = **L**ight **D**etection **a**nd **R**anging) sind durch ihre hohe Auflösung hervorragend für die digitale Analyse und Kartierung von geomorphologischen Kleinformen geeignet. Die große Genauigkeit der daraus abgeleiteten **digitalen Geländem**odelle (DGM) erlaubt das Visualisieren und Detektieren verschiedenster natürlicher und anthropogener Reliefformen, wie zum Beispiel Pingen, Tagesbrüche, Kleinsthalden, Bachläufe, Feld- und Waldwege. Unterschiedliche geomorphologische Strukturen und Formen können mithilfe von computergestützten Geoverarbeitungs- und Analyseverfahren, mathematischen sowie statistischen Techniken und Methoden räumlich abgegrenzt werden.

Die GIS-gestützte Analyse bergbaubedingter Kleinformen steht im Mittelpunkt dieser Forschungsarbeit. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf das Abgrenzen der direkt und indirekt entstandenen Hohl- und Vollformen, die auf den frühen Steinkohlenbergbau zurückzuführen sind. Es wurde eine Methode entwickelt, um solche Formen aus dreidimensionalen LiDAR-Punktdaten zu detektieren.

Hohl- und Vollformen wurden aus einem DGM mit semi-automatischen hydrologischen Abflussberechnungen und manuellen Verfahren identifiziert und auf der Grundlage des LiDAR-basierten DGMs selektiert und klassifiziert.

Es wurden vier Haupttypen bergbaubedingter morphologischer Kleinformen detektiert. Insgesamt konnten 821 entsprechende Objekte im Untersuchungsgebiet identifiziert werden. Die hier über sie gewonnenen Erkenntnisse und ihre Erkundung in einem LiDAR-basierten DGM sind wichtige Ergebnisse, um geomorphologische und speziell bergbauinduzierte Kleinformen im Ruhrgebiet flächenhaft erfassen und besser verstehen zu können.

Abstract:

Due to their high resolution, LiDAR-data sets (LiDAR = **L**ight **D**etection **a**nd **R**anging) can be used for analyzing and mapping of geomorphological small scaled relief features. Because of the high accuracy, the use of **digital terrain models** (DTM) enables the visualisation of several natural and anthropogenic terrain forms, such as sinkholes, dumps, roads, courses of streams and facilitates the detection and distinction of these various geomorphological structures. Therefore, software based geoprocessing and analyzing procedures, mathematical and statistical processing techniques and methods can be used.

The GIS-based analysis of small scaled mining legacies is in the focus of attention in this present study. By taking into consideration the various and complex relief features, the main focus of this investigation lies on ancient coal mining relief forms which occur immediate and/or mediate.

In this study, a LiDAR-based method was developed to detect sinkholes and dumps. According to previous researches, sinkholes and dumps within the digital terrain model were identified and classified by using hydrological computations (semi-automated) and manual processings. For this purpose, the available LiDAR data was utilized.

In this project, four types of mining legacies were identified by using LiDAR data. In total, 821 small scaled relief forms could be identified within the study area. By summing up the findings based on the LiDAR computational model and its related characterized features, these obtained data sets are necessary and required for the understanding and improving area-covering detection of geomorphological (typical relief features of the Ruhr district) small scaled relief features.

Schlüsselwörter:

Airborne Laserscanning, LiDAR, Detektion, digitale Reliefanalyse, Steinkohlenbergbau, Hohlform, Vollform, Tagesbruch, Halde, Geomorphologie

Keywords:

Airborne Laserscanning, LiDAR, detection, digital surface analysis, coal mining, sinkhole/collapse pit and dump, geomorphology, Ruhr district

1 Einführung

Das südliche Ruhrgebiet ist aufgrund seines geologischen Baus und seiner ausstreichenden Kohlenflöze durch tages- und oberflächennahen Steinkohlenbergbau geprägt (DEGE, W. & DEGE, W. 1983: 26). Tagesnahe Grubenbaue sind durch eine gering mächtige (< 30 m) Festgesteinsüberdeckung gekennzeichnet. Grubenbaue des oberflächennahen Bergbaus wurden hingegen in einer Tiefe von bis zu 100 m angelegt und von einer mindestens 30 m mächtigen Festgesteinsüberdeckung überlagert (Bez.-Reg. Arnsberg 2006: 6). Mit dem Steinkohlenbergbau sind, je nach Beschaffenheit der Lagerstätte und verwendeter Abbaumethode (Kohlengräberei, Schacht- u. Stollenbau), unterschiedliche Reliefveränderungen verbunden (vgl. Kap. 3). KASIELKE (2015: 34) gliedert diese ruhrgebietsspezifischen, anthropogen geschaffenen Reliefformen als Ergebnis direkter oder indirekter Einwirkungen (Abb. 1).

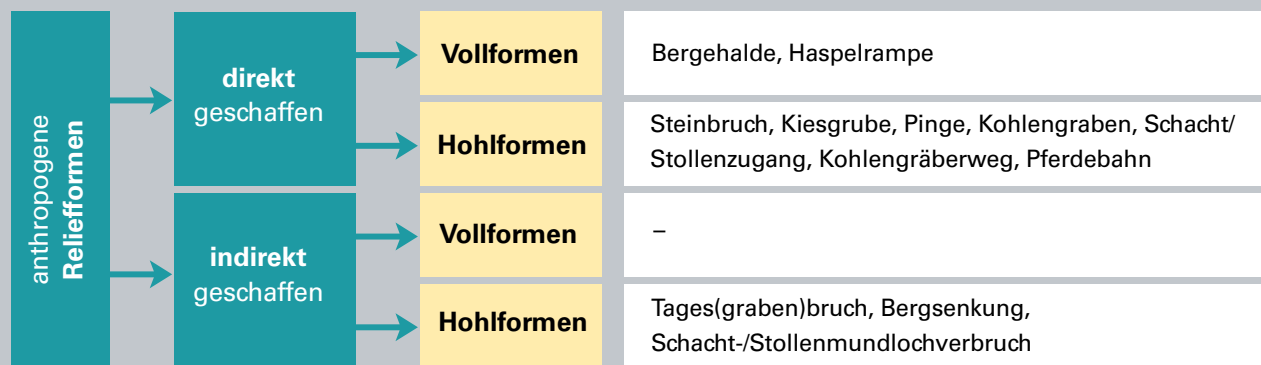


Abb. 1: Gliederung anthropogener, altbergbauspezifischer Reliefformen

(verändert und ergänzt nach LESER 2009: 337 f.; HARNISCHMACHER 2015: 5; KASIELKE 2015: 34)

Seit Mitte der 1960er-Jahre sind in NRW ca. 3 500 Tagesbrüche (Stand 2018) registriert worden – die meisten davon im Ruhrrevier. Zwischen den Jahren 2006 und 2017 wurden durchschnittlich 116 Tagesbrüche pro Jahr gemeldet, wobei fast 60 % davon auf eine bergbauliche Ursache zurückzuführen sind (MWIDE NRW 2017: 2). Daneben sind aus den vorhandenen Unterlagen über 30 000 verlassene Stollen- und Schachtmundlöcher bekannt, 11 500 davon im Einflussbereich der Wasserhaltung im südlichen Ruhrgebiet und rund 2 500, die auf < 100 m abgeteuft wurden (Bez.-Reg. Arnsberg 2018; Bez.-Reg. Arnsberg 2006: 11).

Die meisten Tagesbrüche fallen bei einer Fördertiefe bis 50 m. Wegen ihres plötzlichen Auftretens sind Gebiete des tages- und oberflächennahen Bergbaus, besonders durch (Berg-)Schäden an Gebäuden, Verkehrswegen oder gar Personen, gefährdet (SINGH & DAHR 1997: 338). Aufgrund unvollständiger Dokumentationen, beispielsweise in Form von fehlenden Grubenrissbildern (SZELAG & WEBER 1993: 125; Bez.-Reg. Arnsberg 2006: 9), besteht auch Grund zu der Annahme, dass die tatsächliche Zahl gefallener Tagesbrüche höher liegt, vor allem, weil Verbrüche in bewaldeten Gebieten erst später – gegebenenfalls auch gar nicht – bekannt werden. In diesem Zusammenhang wird ein sich daraus ergebendes Gefahrenpotenzial deutlich. Viele Jahre nach der Einstellung dieser „alten“ bergbaulichen Aktivitäten besteht heute ein Interesse daran, einen umfassenden Ein- und Überblick über die Umfänge des frühen Bergbaus und sein Gefahrenpotenzial zu erhalten. Kenntnisse über die Lage altbergbaulich bedingter Hinterlassenschaften sowie die Bewertung der damit verbundenen Risiken zu erlangen, liegt zum einen im öffentlichen Interesse von Städten und Kommunen, zum anderen in dem der Rechtsnachfolger der alten Zechen- und Grubenbetriebe.

Das Ausmaß großflächiger Bergsenkungen im Ruhrgebiet (vgl. HARNISCHMACHER & ZEPP 2014) und die Verbreitung von Großhalden und Haldenkomplexen der jüngeren Steinkohlenförderung (vgl. KEIL & WETTERAU 2013: 81; HOEPFNER 2012: 21) sind gut erforscht. Die kleinförmigen geomorphologischen Hinterlassenschaften des frühen Bergbaus seit dem 13./14. Jahrhundert sind jedoch bisweilen nicht flächendeckend mit Daten aus Laserscanbefliegungen erfasst worden. Ebenso feh-

len Gesamtdarstellungen bergbauspezifischer Relikte. Es gibt zwar Erwähnungen in bergbauhistorischen Wanderführern entsprechender Vereine, historische Karten oder Erkenntnisse privater Initiativen (z. B. www.ruhrkohlenrevier.de), diese werden jedoch nicht dem Anspruch einer vollständigen Gesamtdarstellung (kleinförmiger) bergbaubedingter Reliefveränderungen gerecht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich im Sinne einer Verdeutlichung der aktuellen topographischen Situation unter besonderer Berücksichtigung kleinförmiger Hohl- und Vollformen des frühen Steinkohlenbergbaus sinnvoll in bereits bestehende Datenbestände einbinden und bisherige Erkenntnisse können durch sie ergänzt werden.

Die noch relativ junge Technologie des Laserscannings (LiDAR = Light Detection and Ranging) scheint nach Abhandlungen zahlreicher Autoren (z. B. UTTING et al. 2010; PASTOL 2011; RAHIMI & ALEXANDER 2013; DOCTOR & YOUNG 2013) eine gute Basis für digitale Reliefanalysen mit bergbauhistorischem Forschungsgegenstand zu sein (vgl. auch Kap. 3.2).

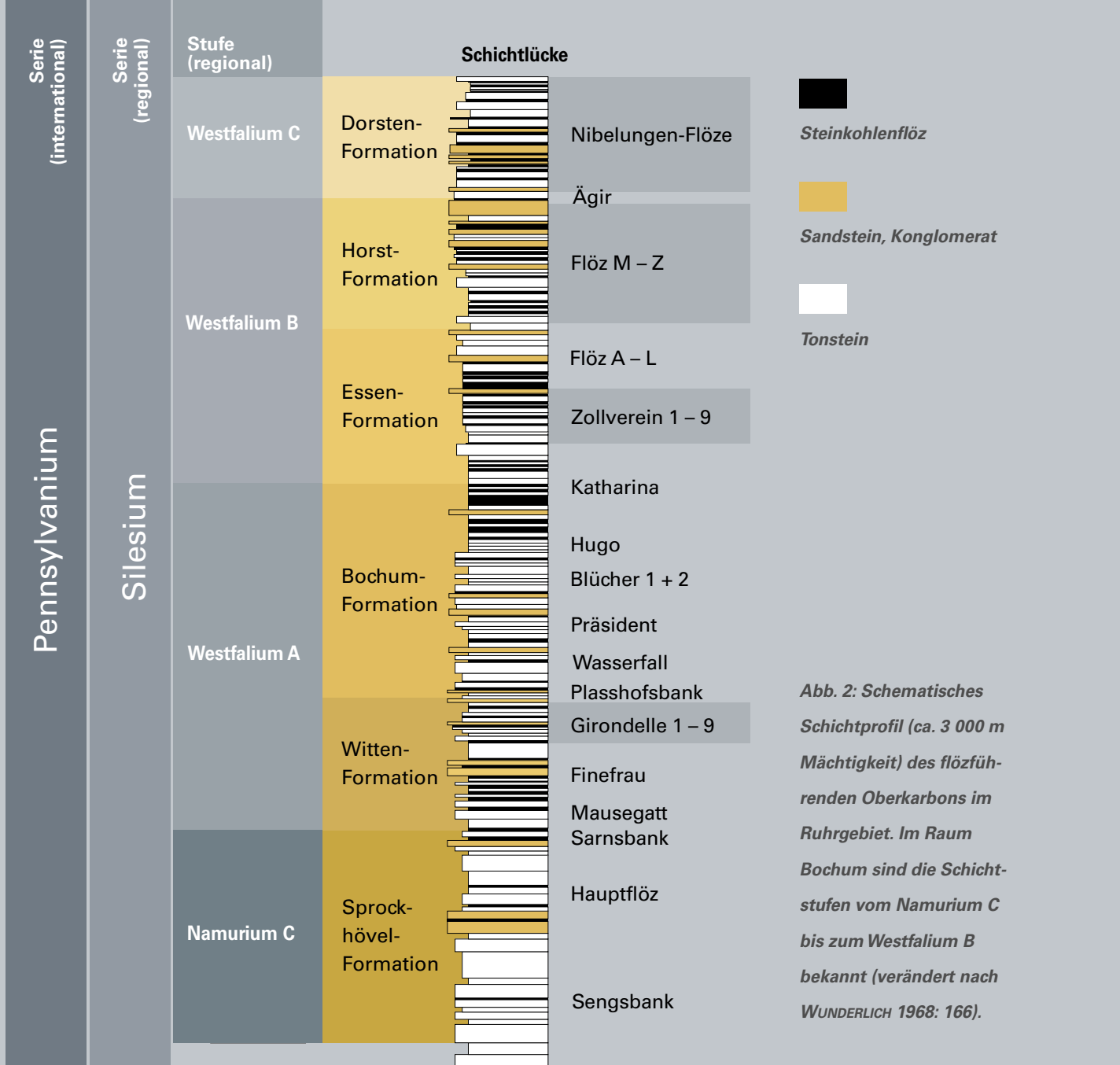
Die Verwendung von Daten aus Laserscanbefliegungen erlaubt eine präzise Erfassung und Darstellung der Geländeoberfläche. Erkenntnisse aus Studien von ACKERMANN (1999), DOCTOR & YOUNG (2013) und RAHIMI & ALEXANDER (2013) bilden die theoretisch-methodische Basis für die LiDAR-gestützte Detektion bergbaubedingter Kleinformen.

Auf der Grundlage der Recherchen verfolgt die vorliegende Arbeit nachstehende Ziele:

- Durch die Auseinandersetzung mit dem Thema Steinkohlenbergbau im südlichen Ruhrgebiet wird zum einen eine Katalogisierung und zum anderen die Detektion von Relikten anthropogenen Handelns, welche in Zusammenhang mit der ober- und untertägigen Steinkohlengewinnung im Süden Bochums zu sehen sind, erarbeitet.
- Als ein Ergebnis der LiDAR-gestützten Reliefanalyse wird für das Untersuchungsgebiet eine flächendeckende kartographische Gesamtdarstellung der Geländeoberfläche mit ihren bergbaulichen Hinterlassenschaften erzeugt. Des Weiteren sollen die Eignung und das Potenzial von LiDAR-Daten als ergänzende Methode für die Erfassung geomorphologischer Kleinformen beurteilt werden.
- Der Bochumer Süden soll hier als eine Beispielregion des südlichen Ruhrgebietes mit einem über Jahrhunderte intensiv durch Kohlenbergbau geprägten Relief herangezogen und untersucht werden (vgl. Kap. 2). Auf mittel- und langfristige Sicht soll so eine Basis für weiterführende Forschungsarbeiten und Methodenentwicklungen bereitgestellt werden.

Im Untersuchungsgebiet finden sich typische reliefbezogene Relikte des frühen Kohlenbergbaus wie zum Beispiel Pingen, Halden und Tagesbrüche (vgl. Kap. 3).

Die Analyse orientiert sich an der Grundannahme, dass zur Zeit des LiDAR-Überflugs bergbaubedingte Hohl- und Vollformen im Untersuchungsgebiet existiert haben und aus den Daten zu identifizieren sind. Die Grundlage für diese Analyse ist ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) der heutigen Landoberfläche, das mit einer Fernerkundungssoftware berechnet wurde.



2 Geologische Entwicklung und bergbauliche Nutzung des Untersuchungsgebietes

Das Ruhrgebiet gehört im Wesentlichen zu drei natürlichen Großräumen: dem Niederrheinischen Tiefland, der Münsterländischen Tieflandsbucht und dem Süderbergland. Seine steinkohlenführenden Schichten sind während des Oberkarbons vor ca. 325 – 300 Mio. Jahren entstanden. In dieser Zeit wurden hier über 300 Steinkohlenflöze abgelagert. Sie gehören jeweils einem etwa 10 m dicken Gesteinszyklus an, der häufig aus der Folge Sandstein – Tonstein – Wurzelboden – Kohle – Tonstein – Sandstein besteht (Abb. 2; DROZDZEWSKI & KOETTER 2008: 290 f.).

Wie auch RAGSCH & PONTHÖFER (1986: 8) beschreiben, ist die Entwicklung des Ruhrkohlenreviers und die Entstehung der Steinkohle mit wechselvollen erdgeschichtlichen Veränderungen und dem Zusammentreffen günstiger Faktoren zu begründen. Die Geländeoberfläche des südlichen Ruhrge-



- ◆◆ Sattelachse
- x-x- Muldenachse
- ▲ Überschiebung
- ↑↑ Abschiebung
- ↔ Blattverschiebung
- ⊂ Untersuchungsgebiet

Stratigraphische Gliederung

Flöz	Formation
Katharina	KA
Plasshofsbank	PL
Sarnsbank	SA
	Grenzsandstein
	Essen-
	Bochum-
	Witten-
	Sprockhövel-

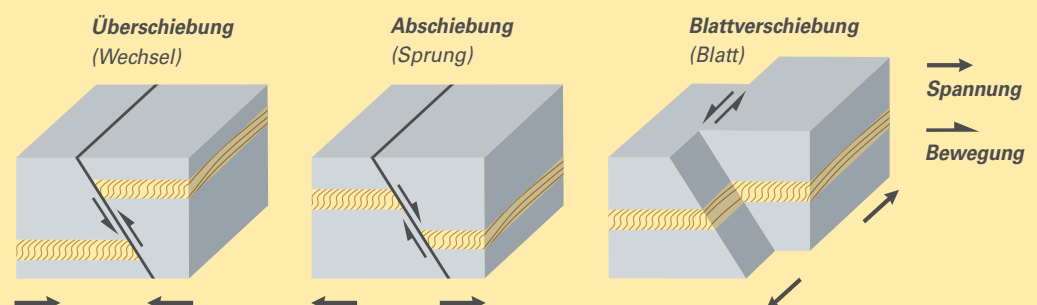
0 2 km

Abb. 3: Horizontalschnitt durch das Steinkohlengebirge im Stadtgebiet Bochum auf dem Niveau 500 m u. NHN (verändert nach BADER & RÖTTGER 1987: 17)

bietes ist vor allem durch widerstandsfähige, während der variszischen Gebirgsbildung stark gefaltete Festgesteine aus der Devon- und Karbon-Zeit gekennzeichnet. Das waschbrettartige Relief ist hier überall zu erkennen. Die Größenordnung der einzelnen Falten variiert stark. Innerhalb der großen Hauptsattel und -mulden, die das Ruhrkarbon von Westsüdwest nach Ostnordost durchziehen, existieren zahlreiche kleinere Spezialsattel und -mulden, die sich wiederum in Falten mit Dimensionen im Meter- bis Dezimeterbereich gliedern (KASIELKE 2015: 19; Abb. 3).

Mit der Engfaltung der Schichten im Raum Bochum ist auch eine ausgeprägte Störungstektonik verbunden. Die besonders im südlichen Ruhrgebiet wirkenden Schub- und Zugkräfte führten zu einer Zergliederung des Gebirges durch Überschiebungen, Abschiebungen und Blattverschiebungen (Abb. 4). Diese geologischen Rahmenbedingungen erschwerten den Steinkohlenbergbau enorm.

Abb. 4: Typisierung von Verwerfungen nach der Bewegungsrichtung; in Klammern die im Ruhrbergbau gebräuchlichen Bezeichnungen (verändert nach KASIELKE 2015: 20)



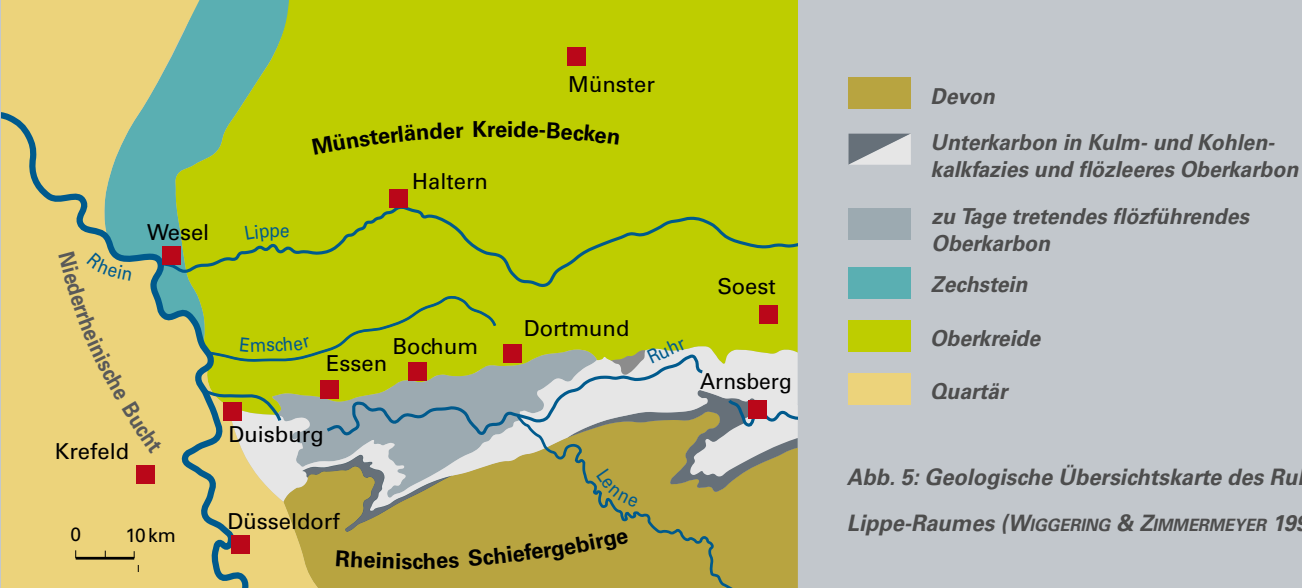


Abb. 5: Geologische Übersichtskarte des Ruhr-Emscher-Lippe-Raumes (WIGGERING & ZIMMERMEYER 1993: 16)

Im Bochumer Süden wird das gefaltete Grundgebirge der Karbon-Zeit – im Gegensatz zum mittleren und nördlichen Ruhrgebiet – nicht von ungefaltetem, kreidezeitlichem Deckgebirge überlagert (Abb. 5). Zudem wurde der Bereich des oberflächennahen Karbons durch die Ruhr und die ihr zufließenden Gewässer zerschnitten.

Das südliche Ruhrgebiet mit seinen ausstreichenden Steinkohlenflözen wird im Allgemeinen als Ausgangspunkt der montanhistorischen Entwicklung der Region betrachtet. Der Steinkohlenbergbau als solcher reicht hier bis weit ins 13. Jahrhundert zurück.

Zur Zeit des mittelalterlichen, sogenannten Uraltbergbaus wurde die Kohle durch einfaches Graben von der Tagesoberfläche aus gewonnen. In den auch Kohlengräberei genannten Schurfstellen wurde die Kohle aber auch schon gewerblich abgebaut (GANTENBERG 2009: 21).

Die aus dieser Zeit stammenden, anthropogen geschaffenen Reliefformen des Bergbaus sind Kohlengräber- oder Schurfächer, sogenannte Pinggen, mit den dazugehörenden Halden. Auf ihnen wurden die nicht verwertbare Kohle und unverwertbares Nebengestein (= Bergematerial) abgelagert (GANTENBERG 2009: 21). Die Kohlengräberei überwog in der frühesten Phase des Steinkohlenbergbaus. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese Abbauförm auch in Krisen- und Notzeiten des 19. und 20. Jahrhunderts (dann als Raubbau bezeichnet) betrieben wurde (SZELAG & WEBER 1993: 125; BADER & RÖTTGER 1987: 22). Mit dieser ertümlichen Methode konnte aber nur bis in wenige Meter Tiefe, maximal bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels, abgebaut werden (PFLÄGING 1999: 20). War dieser erreicht, verhinderte das zufließende Wasser weitere Fördertätigkeiten (Abb. 6).

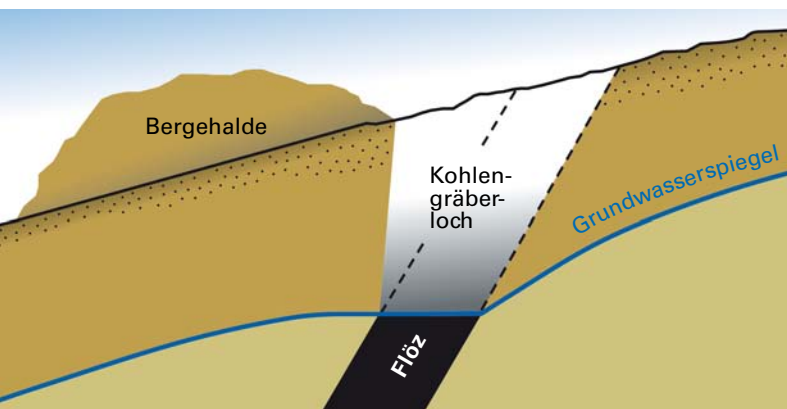


Abb. 6: Der Ausbiss eines Kohlenflözes und die Grundwasserproblematik der frühen Kohlengräberei (verändert nach BADER & RÖTTGER 1987: 22)

Neue „Löcher“ wurden dann in Richtung des Streichens der ausbeißenden Kohlenflöze gegraben. Bei diesem sich wiederholenden Vorgehen entstanden Pingenzüge oder auch Pingenfelder. Mancherorts wurde die Kohle auch in Gräben, sogenannten Ackeldriften, gewonnen (SCHILP & REININGHAUS & HUSKE 1993: 225).

Etwa ab dem Spätmittelalter (ca. 15. Jh.) begann man, neben den geschürften Pingen und Gräben auch seigere (= senkrechte) oder tonnlägige (= schräge) Schächte anzulegen. Die in Streichrichtung angelegten Kohlengräben wurden teilweise später zu Stollen ausgebaut, die leicht ansteigend im Gebirge vorgetrieben wurden. Auch die tages- und oberflächennahen Stollenbauten waren von der Grundwasserproblematik betroffen. Die Entwässerung der Gruben- bzw. Stollenfelder und damit auch der Abbau bis in größere Tiefen wurden erst mit dem Anlegen von Erbstollen erreicht.

Um die Präzision und Schnelligkeit beim Vortrieb der Stollen zu erhöhen, wurden sogenannte Lichtlöcher von der Tagesoberfläche senkrecht zum Stollen bzw. zum Flöz abgeteuft. Sie dienten auch der Bewetterung (KNAUF 2012: 56; PFLÄGING 1999: 21). Der Stollenbergbau auf diese Art und Weise war bis ins 18. Jahrhundert Standard (PFLÄGING 1999: 21; DROZDZEWSKI & KOETTER 2008: 302; HUSKE 2006: 12; FESSNER 1998: 37).

Relikte aus dieser Zeit zeigen sich auch heute noch an vielen Orten des südlichen Ruhrgebietes. Zu den bereits erwähnten Schürfen und Aufhaldungen der frühen Kohlengräberei sowie der Anwendung der Schacht- und Lichtlochtechnik kommt durch den Stollenbergbau eine weitere Erscheinungsform bergbaubedingter Hinterlassenschaften hinzu: Der oberflächen- und tagesnahe Bergbau kann, auch Jahrzehnte nach der Stilllegung, zu verbrechenden Grubenbauen und daraus folgenden Tagesbrüchen führen (MEIER, G. & MEIER, J. 2007: 92; Bez.-Reg. Arnsberg 2006: 7). Aus teilweise mangelnden Kenntnissen über den Umfang jenes Bergbaus ergibt sich ein latentes Gefahrenpotenzial.

Mit den zunehmenden Abbautiefen seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts geht auch eine veränderte Morphometrie der Hinterlassenschaften des Bergbaus an der Tagesoberfläche einher: Aus den einst unregelmäßigen, „planlosen“ Halden des präindustriellen Bergbaus wurden große Spitz- oder Tafelhalden. Damit endete die Entstehung der ursprünglichen, direkt entstandenen Kleinformen.

Das Untersuchungsgebiet im Bochumer Süden erscheint aufgrund der genannten geologischen, geomorphologischen und montanhistorischen Faktoren besonders interessant, um die Eignung der LiDAR-gestützten Reliefanalyse in Bezug auf altbergbauliche Hinterlassenschaften festzustellen.

3 Theoretische Aspekte

3.1 Formenkatalog bergbaubedingter Hohl- und Vollformen

Die durch ehemaligen Abbau im Relief hinterlassenen tagesnahen Hohlformen werden als Pingen bezeichnet. Grundsätzlich beschreibt der Begriff anthropogen geschaffene Reliefformen, die sowohl direkt beim Kohlengraben als auch indirekt, nach dem Verfüllen von Schächten und dem Verbrechen oberflächennaher Stollen, entstanden sind (ZEPP 2011: 303 f.). Sie zählen zu den häufigsten Hinterlassenschaften des frühen Bergbaus (vgl. Kap. 2).

In den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.3 geht es auch um den Versuch einer Klassifikation und Kennzeichentrennung der Subgruppen „Kohlengräberloch“ und „Tagesbruch“. Nachfolgend wird davon abgesehen, diese umfassend als Pingen zu bezeichnen – Tagesbrüche werden gesondert definiert. Die in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.3. beschriebenen bergbaubedingten oberflächlichen Kleinformen sind in Abbildung 10 dargestellt.

3.1.1 Kohlengräberlöcher (= Pingen), Kohlengräben

Bei einem Kohlengräberloch wurde die Kohle von der Tagesoberfläche aus abgebaut. Der Abbau folgte dem Streichen der Flöze, entweder in Form lang gezogener Gräben oder häufiger in Form trichter- und schüsselförmiger, teilweise unregelmäßiger Vertiefungen im Gelände. Dem Ausstreichen der Kohlenflöze entsprechend, ergeben sich perlschnurartige, als Pingenzüge bezeichnete Anordnungen von mehreren Hohlformen (MEIER, G. & MEIER, J. 2007: 92 u. 99). Ein weniger geordnetes Bild zeigen Pingenfelder (KNAUF 2012: 46).

BEIER (2003: 31) und KASIELKE (2015: 34) beschreiben direkt geschaffene Pingen als kaum von Bombentrichtern zu unterscheidende Trichter, die nur wenige Meter tief und breit sind.

Daneben existieren auch weitere, durch das Nach- bzw. Einsacken (Verbrechen) bereits verfüllter seigerer oder tonnlägiger Schächte und Lichtlöcher entstandene tagesnahe Hohlformen (MÜGGE & CRAMM & RÜHL 2008: 386). Der Querschnitt dieser Schächte lag ungefähr zwischen 90 x 90 cm und 2 x 2 m (KNAUF 2012: 56; MÜGGE & CRAMM & RÜHL 2008: 386). Sie wurden entweder rechteckig oder quadratisch angelegt. Daher ist zu erwarten, dass der Durchmesser der verbliebenen Schachtpingen in etwa diesen Größenordnungen entspricht. Ein Foto in KNAUF (2012: 47) lässt erkennen, dass auch im Bereich verstürzter Stollenmundlöcher pingentartige (Relief-)Formen existieren können. In der Regel verfügen diese über einen hydrologischen Abfluss, der vermutlich auch im Geographischen Informationssystem sichtbar gemacht werden kann.

3.1.2 Halden

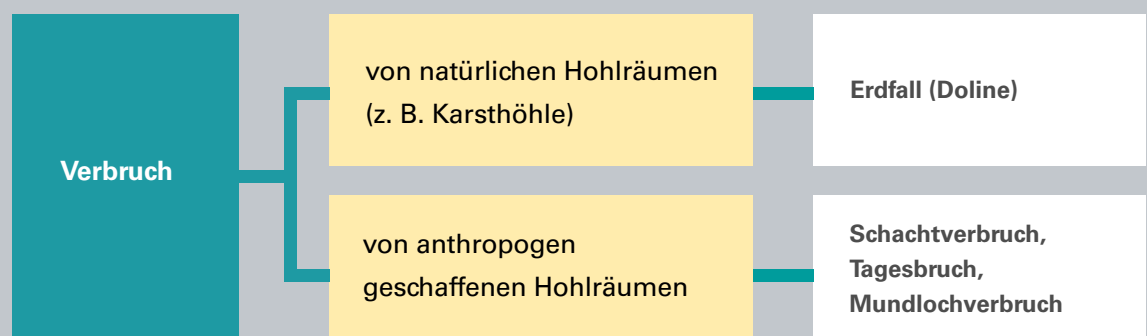
Halden stellen die notwendige Ergänzung zu Pingen (außer Tagesbrüche) dar, da das Bergematerial, welches beim Kohlengraben oder dem Vortreiben von Schächten und Stollen anfiel und keiner weiteren Verwendung zugeführt werden konnte, aufgehaldet wurde. In der Regel geschah dies in unmittelbarer Nähe zu den Kohlengräberlöchern. Aufgrund dieser Verknüpfung sind Halden in ähnlich großer Anzahl wie Pingen entstanden und bis heute erhalten geblieben. Im geomorphologischen Sinne handelt es sich bei diesen Reliefformen um durch direkten anthropogenen Eingriff entstandene Vollformen.

Ihre Ausgestaltung ist vielfältig und ein Grund dafür, warum sie in Verbindung mit Pingen kaum von Bombentrichtern zu unterscheiden sind. In präindustrieller Zeit wurden sie, im Gegensatz zu den planmäßigen Halden des 19. und 20. Jahrhunderts, oft in eher kleinen unregelmäßigen Formen aufgeschüttet (HOEPFNER 2012: 20). Die „alten“ Halden weisen kranzartige, ringförmige (meist nicht vollständig geschlossene) und in Hanglage oft zungenartige Formen auf (GORELIK & STEFFENS 2012: 42 u. 44). Die Größe bzw. das Volumen von Halden ist nicht sehr genau zu bestimmen, da sie, besonders an Hängen, nicht so charakteristisch und klar von der Umgebung abzugrenzen sind wie beispielsweise Pingen. Man kann davon ausgehen, dass Halden von Schächten, Lichtlöchern und Stollen(-mundlöchern) größer sind als solche, die beim Kohlengraben entstanden sind, da bei den erstgenannten, fortschrittlicheren Abbaumethoden mehr Nebengestein gefördert und auf Halde genommen wurde.

3.1.3 Tagesbrüche

Die dritte in Altbergbaugebieten häufig vorkommende Untergruppierung von Pingen sind Tagesbrüche. Bei ihnen handelt es sich um durch menschliche Eingriffe indirekt entstandene Hohlformen. Ihr oft unvorhergesehenes Auftreten durch das Verbrechen von Hohlräumen im Untergrund stellt in den Altbergbaugebieten wie dem südlichen Ruhrgebiet auch gegenwärtig ein Risiko dar. Natürlich entstandene Erdfälle (Dolinen) haben eine ähnliche Erscheinungsform wie anthropogene Tagesbrüche (Abb. 7).

Abb. 7: Definition des Begriffs „Verbruch“ (verändert nach MEIER, G. & MEIER, J. 2007: 92)



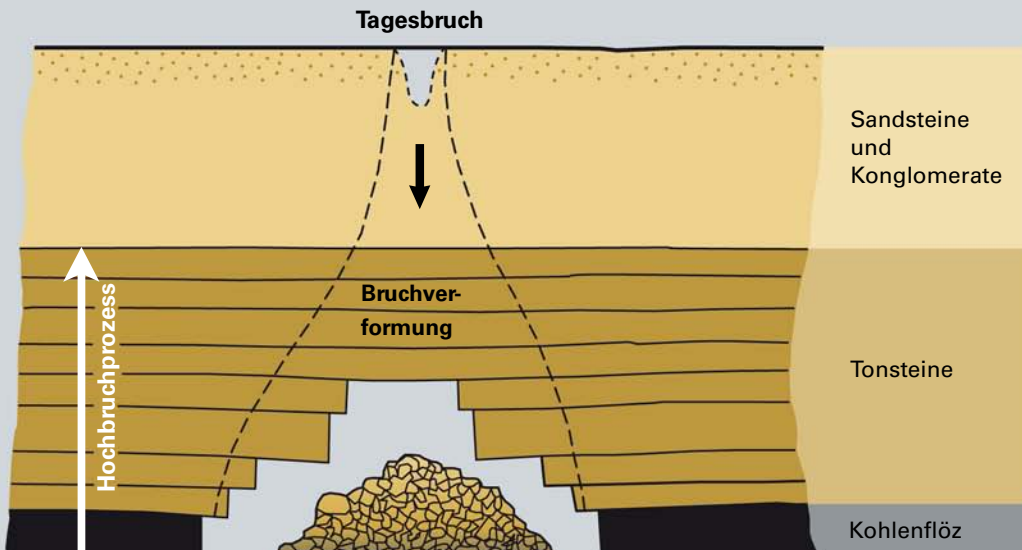


Abb. 8: Das gewölbeartige Hereinbrechen der Hangend-schichten in einen schmalen, tagesnahen Abbauhohlraum (verändert nach KRATZSCH 1974: 50)

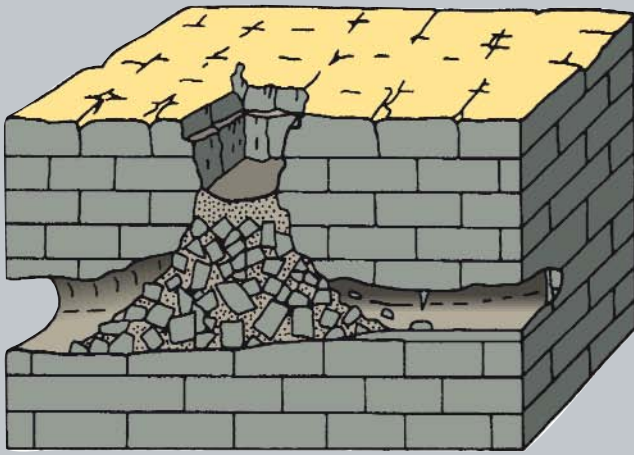
Ein Tagesbruch stellt aus ingenieurgeologischer und gebirgsmechanischer Sicht die Endphase eines als Hochbruchprozess bezeichneten, dynamischen, dreidimensionalen Verbruchvorgangs mit Durchschlag zur Tagesoberfläche im Locker- oder Festgestein dar (MEIER, G. & MEIER, J. 2007: 92; Abb. 8).

Grundvoraussetzung dafür ist, dass sich im Untergrund ein Hohlraum (tonnlägiger Schacht oder Stollen) befindet. Ausschlaggebend dafür, ob ein Tagesbruch fällt oder nicht, sind nach WEDDE (2003: 44) und BELL & DONNELLY (2006: 179):

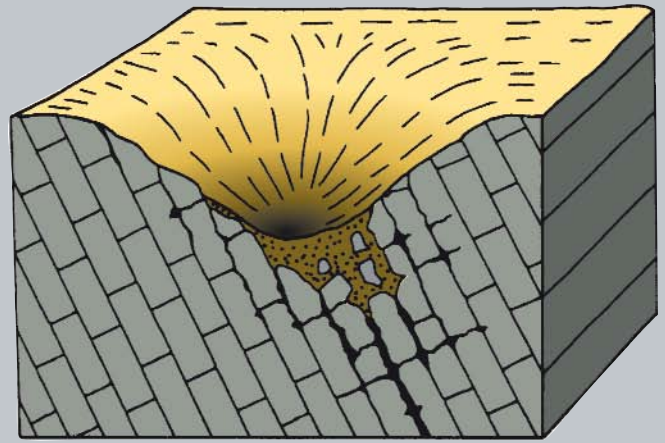
- die Mächtigkeit und Zusammensetzung der Fest- und Lockergesteinsüberdeckung und deren Beanspruchung (z. B. durch Erdbeben)
- die geologischen Lagerungsverhältnisse
- die Standfestigkeit des Hangenden
- Witterungseinflüsse (Verwitterung, Ausspülung und Auslaugung)
- die Teufenlage der Grubenbaue und deren Standfestigkeit
- die Art der Beanspruchungen der Tagesoberfläche
- die Zeit

Wegen der Vielzahl von Einflussfaktoren ist die Vorhersage von Tagesbrüchen ungemein schwer. Sie können kurze Zeit nach der Einstellung der Bergbauaktivitäten oder erst nach Jahrhunderten fallen (HUTCHINSON & PHILLIPS & CASCANTE 2002: 42 f.; WEDDE 2003: 43).

Ihr meist punktuelltes Auftreten beschreiben MEIER, G. & MEIER, J. (2007: 92 f.) in Idealform als ein in der aktiven Verbruchzone senkrecht stehendes, halbiertes Rotationsellipsoid. Je nach Stadium kann die Form von Tagesbrüchen mit überhängenden Verbruchrändern, über senkrecht zylindrische bis hin zu (konsolidierten) trichter- oder grabenartigen Hohlformen variieren. Gerade Letztere sind nur schwer von Pingen zu unterscheiden. Dies gelingt nur über die Zuordnung der beim Kohlengraben zusätzlich entstandenen Halden und deren räumliche Nähe zu den Hohlformen.



Einsturzdoline



Lösungsdoline (verändert nach JENNINGS 1985: 107)



Tagesbruch im Jungstadium



Tagesbruch im Spätstadium (konsolidiert; in Anlehnung an SINGH & DHAR 1997: 334; van den EECKHAUT et al. 2007: 31)

Abb. 9: Gegenüberstellungen der Verbruchbilder von natürlichen und anthropogenen Hohlformen

Es ist davon auszugehen, dass Halden bei Tagesbrüchen fehlen. In der Draufsicht sind Tagesbrüche häufig rundlich, oval oder elliptisch. Sie können aber auch in der Nachbarschaft von Pinggen und damit auch in der Nachbarschaft von Halden gefunden werden, was die morphologische Abgrenzung zu Pinggen erschwert. Ihr Durchmesser und ihre Tiefe können von wenigen Dezimetern bis zu mehreren Zehnermetern schwanken und sich über die Zeit verändern.

PÉNTEK & VERESS & LÓCZY (2007: 26 f.) sowie MEIER, G. & MEIER, J. (2007: 97 u. 102) stellen zudem heraus, dass sich Verbruchentwicklung und -bilder von Tagesbrüchen und Dolinen kaum unterscheiden (Abb. 9).

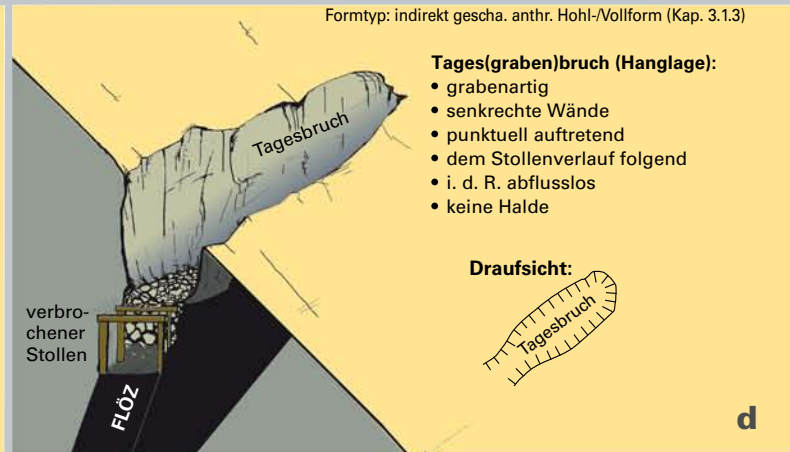
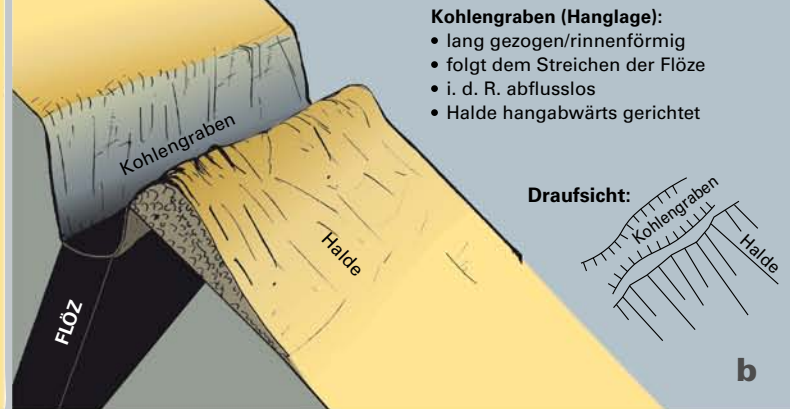


Abb. 10: Formen katalog bergbaubedingter (ruhrbergbauspezifischer) kleinförmiger Hohl- u. Vollformen. a und b sowie g und h stehen in leicht möglicher Variabilität für alle in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Hohl- und Vollformen. Abbildung g zeigt die leicht versetzte Lage eines Lichtlochs im Vergleich zum Kohlenflöz. c – f beschreiben Tagesbrüche (vgl. Kap. 3.1.3) im Jungstadium (c und d) bzw. Poststadium (e und f) (in Anlehnung an BADER & RÖTTGER 1987: 22; SINGH & DHAR 1997: 334; PFLÄGING 1999: 20; VAN DEN ECKHAUT et al. 2007: 31; GANTENBERG 2009: 21; WÓJCIK 2012: 194 f.; MÜGGE & CRAMM & RÜHL 2008: 387)

Tabelle 1:

Übersicht typischer anthropogener und natürlicher Kleinformen und ihre Kennzeichen

Typ	Entstehung	Bezeichnung	Kennzeichen
bergbaubedingte Kleinform	direkt	Pinge Kohlengraben	trichter-/schüssel-/graben- oder rinnenförmig; folgt dem Streichen der Flöze; wenige Meter tief u. breit; wenn Pinge (= abflusslos); Halde meist hangabwärts gerichtet
		Bergehalde	hangabwärts gerichtet; Pinge wird i. d. R. nicht vollständig umschlossen
		Schacht Lichtloch Stollenmundloch	Form s. o., manchmal nicht abflusslos; Halde gegebenenfalls größer und/oder nicht unmittelbar angrenzend
	indirekt	Tagesbruch	senkrecht-zylindrische Wände, je nach Alter auch trichterförmig (konsolidiert); rundlich/oval oder elliptisch; fehlende Bergehalde
		(Bergsenkung)	vorwiegend flächenhafte Absenkung; großflächig
nicht bergbaubedingte Kleinform	natürlich	Erdfall	s. Tagesbruch; nur in verkarstungsfähigem Gestein
		kleine Senke	geringe Fläche u. Tiefe
		Löcher entwurzelter Bäume	trichter-/schüsselförmig; sowohl unregelmäßige als auch linienhafte Anordnung; meist umschließender Kraterwall (= Bombentrichter)
		Bombentrichter	
	anthropogen	Hohlweg	U-förmiges Profil; keine Aufhaldung an den Randbereichen; je nach Alter Eintiefung und Bildung von Hangschutt (dann V-förmiges Profil)
		künstliches Becken (z. B. Teich)	meist symmetrischer/regelmäßiger Grundriss; geringflächig bis großflächig
		Entwässerungsgraben	vorwiegend linienhaft; oft entlang von Wegen

Die Unterscheidung zwischen natürlichen und anthropogenen Verbrüchen und die in diesem Kapitel herausgearbeiteten Merkmale bergbaubedingter Kleinformen sind eine wichtige theoretische Basis für die Methodik dieser Arbeit (s. Kap. 4). Typische bergbaubedingte und natürliche Kleinformen und deren Kennzeichen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Zusammenstellung ermöglicht die Definition bestimmter Kriterien für die Unterscheidung bergbaubedingter und nicht bergbaubedingter Kleinformen im Geographischen Informationssystem.

Die Formentypen aus den Kapiteln 3.1.1 – 3.1.3 können an allen natürlichen Hangtypen bzw. Wölbungsarten des Reliefs auftreten. Ihre Formen können – je nach Lage im Relief – variieren.

Der Formenkatalog ist neben den LiDAR-Daten die theoretische Grundlage für die LiDAR-gestützte Detektion bergbaubedingter Kleinformen.

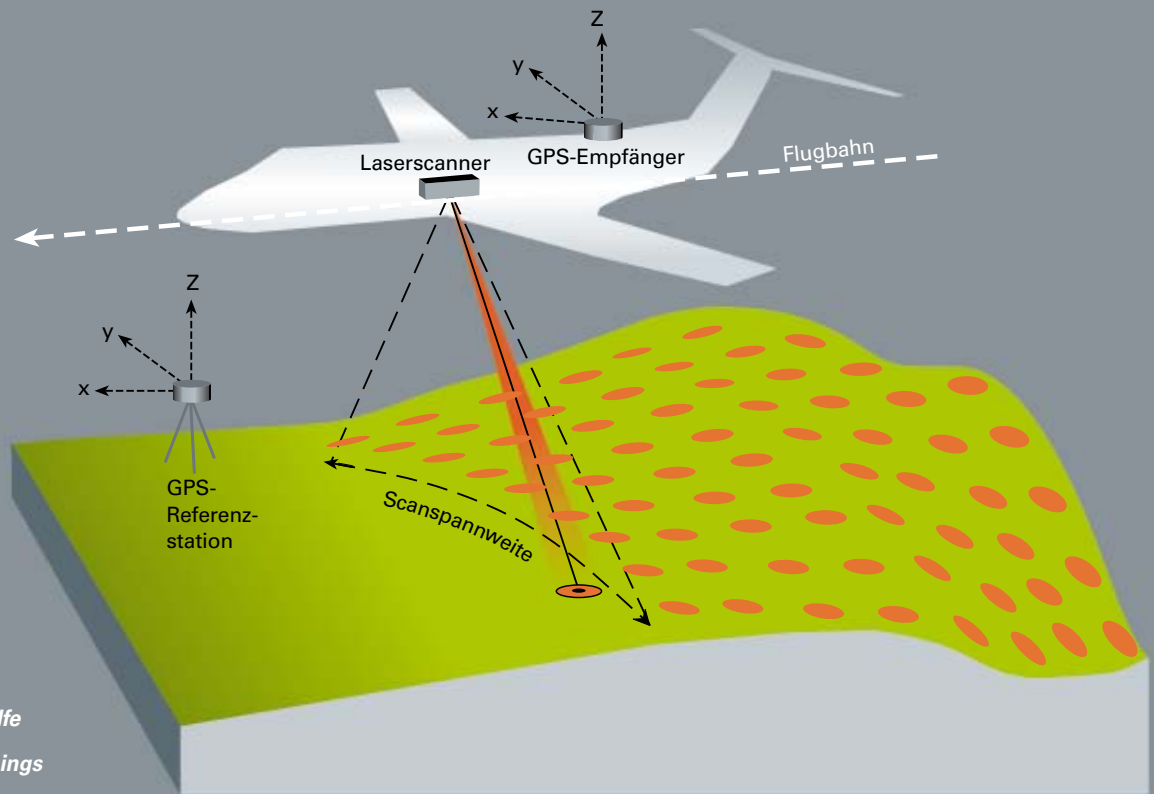


Abb. 11: Prinzip der Geländeerfassung mithilfe des Airborne Laserscannings

3.2 Airborne Laserscanning und dessen Anwendung im Bereich digitaler Reliefanalysen

Bei der digitalen Vermessung der Geländeoberfläche werden Höheninformationen großflächig mithilfe eines Laserscanners von einem Flugzeug aus erfasst (Abb. 11).

Es werden zunächst über einen schwenkbaren Spiegel hochfrequente Laserimpulse zur Erdoberfläche gesendet und anschließend die zurückgeworfenen Signale über einen Sensor registriert. Für jeden Impuls werden neben einer hochgenauen Winkelmessung aus Flugzeugbewegung und Winkelstellung des Scannerspiegels auch Intensitäts- sowie Höhendifferenzmessungen durchgeführt. Unter Einbeziehung der genannten Parameter lässt sich abschließend über die Bestimmung der Laufzeit zwischen gesendetem und empfangenem Signal die zurückgelegte Strecke berechnen und die Höhenlage der abgetasteten Geländeoberfläche bestimmen. Jeder gemessene Punkt wird über GPS lagebestimmt, sodass ein digitales Geländemodell der Landoberfläche aus einer dreidimensionalen Punktwolke mit Rechts-, Hoch- und Höhenwert berechnet werden kann. Im Gegensatz zu digitalen Oberflächenmodellen, der Basisverarbeitung von Laserscanningdaten, stellen digitale Geländemodelle nur die Erdoberfläche dar. Punkte, die nicht an der Geländeoberfläche liegen und das Geländemodell verfälschen würden, wie zum Beispiel Gebäude- oder Vegetationsoberflächen, werden über spezielle Berechnungsverfahren herausgefiltert. Dieser Filtervorgang reduziert die Punktwolke auf sogenannte ground returns.

Das vermehrt seit Ende der 1990er-Jahre eingesetzte Airborne Laserscanning (ALS) bildet heute vielfach die Grundlage für Forschungsprojekte im Bereich digitaler Reliefanalysen. In zahlreichen Veröffentlichungen konnte schon über die Eignung des ALS-Verfahrens für die Untersuchung geologischer oder bergbaulicher Fragestellungen berichtet werden. So wiesen KÜHN & TREMBICH & HÖRIG (1998) bergbauinduzierte Gefahren mithilfe der Auswertungen von Fernerkundungsdaten nach. Die vielversprechenden Ergebnisse veranlassten MÜNCH & NESTLER (2003) zu einer methodisch fortgeschritteneren Herangehensweise, mit deren Hilfe ihnen aus LiDAR-erstellten Geländemodellen die Identifikation von ehemaligen untertägigen Abbaubereichen gelang. In der Arbeit zeigte sich außerdem, dass aufgrund der Vielzahl der beim Laserscanning ausgesendeten Impulse auch in bewaldeten Arealen – in Abhängigkeit von der Vegetationsperiode – eine nahezu lückenlose Erfassung der Geländeoberfläche möglich ist.

In jüngeren Arbeiten findet eine zunehmende Verfeinerung der Methodik hin zu verbesserten Interpretations- und Analysemöglichkeiten statt.

Untersuchungen von DOCTOR & YOUNG (2013) sowie RAHIMI & ALEXANDER (2013) zur Detektion von Dolinen mittels LiDAR-Daten legen nahe, dass die Methode auch für eine fernerkundungsgestützte Erkennung von bergbaubedingten Kleinformen geeignet ist.

Daten aus ALS-Verfahren bilden in dieser Arbeit die Basis der digitalen Reliefanalyse. Sie stellen damit das wichtigste Element der Untersuchung dar.

3.3 Datengrundlage

Für die Untersuchung der Geländeoberfläche im Bochumer Süden wurden LiDAR-Punktdaten (Rohdaten) aufbereitet, welche von Geobasis NRW im Jahr 2015 bereitgestellt wurden. Der Überflug für das Laserscanning fand im März 2012 statt. Die Höhengengenauigkeit der LiDAR-Daten beträgt 0,2 m und die Lagegenauigkeit 0,5 m bei einer Auflösung von im Mittel 4 Messpunkten pro Quadratmeter (Geobasis NRW 2015).

4 Methodik

Für die Identifizierung altbergbaubedingter Kleinformen – Reliefformen, die ihrer Größenordnung nach Formentypen des Mikroreliefs entsprechen (DIKAU 1989: 52 f.) – wurden insgesamt vier Arbeitspakete aufgestellt:

- Zunächst wurden Hohlformen im Allgemeinen als abflusslose Senken und darüber hinaus durch ihr Tiefen-Flächen-Verhältnis definiert.
- In einem weiteren Schritt wurden kleinförmige Relikte des Steinkohlenbergbaus (vgl. Kap. 2 u. 3.1) voneinander abgegrenzt und im Geographischen Informationssystem (GIS) unterschieden.

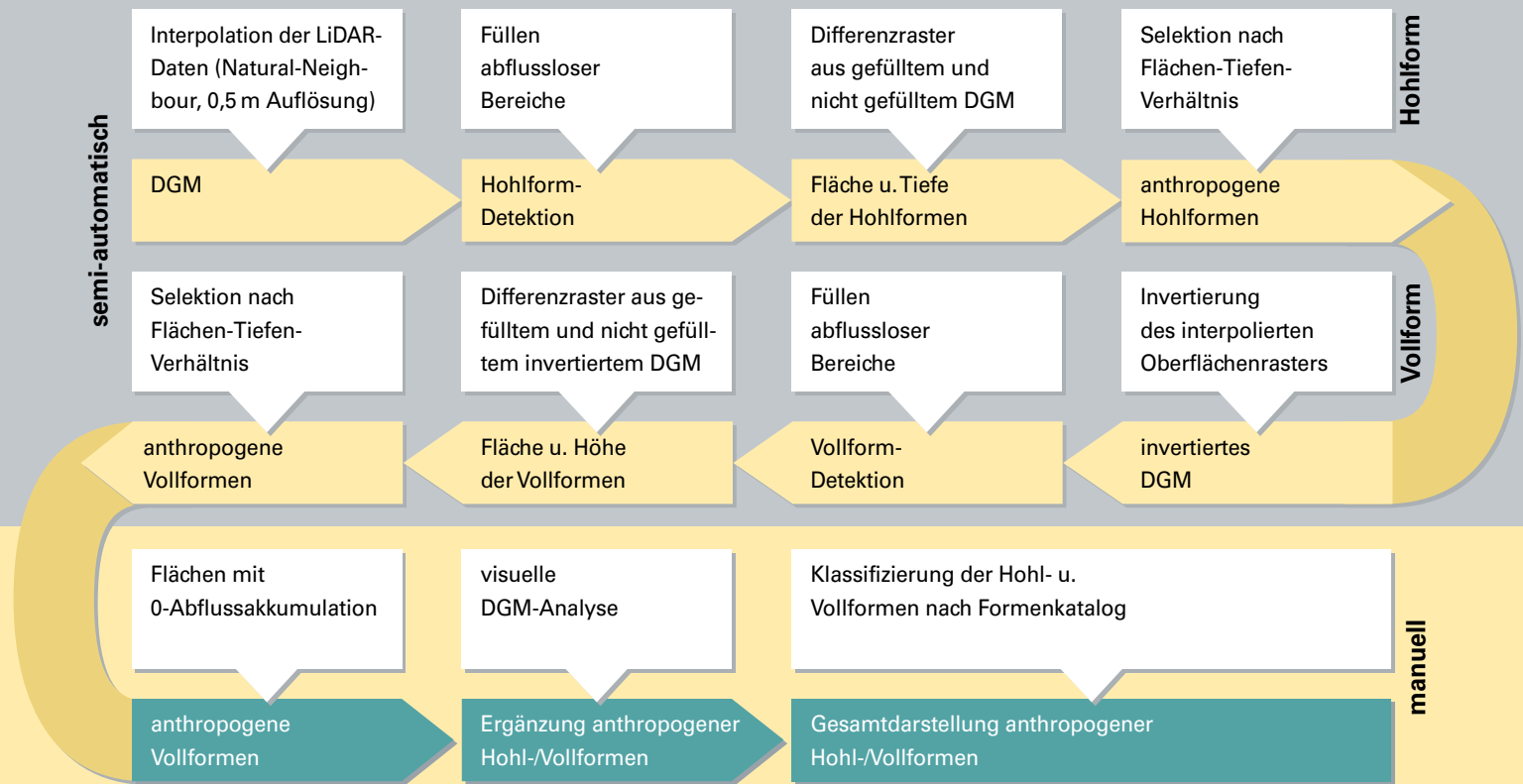
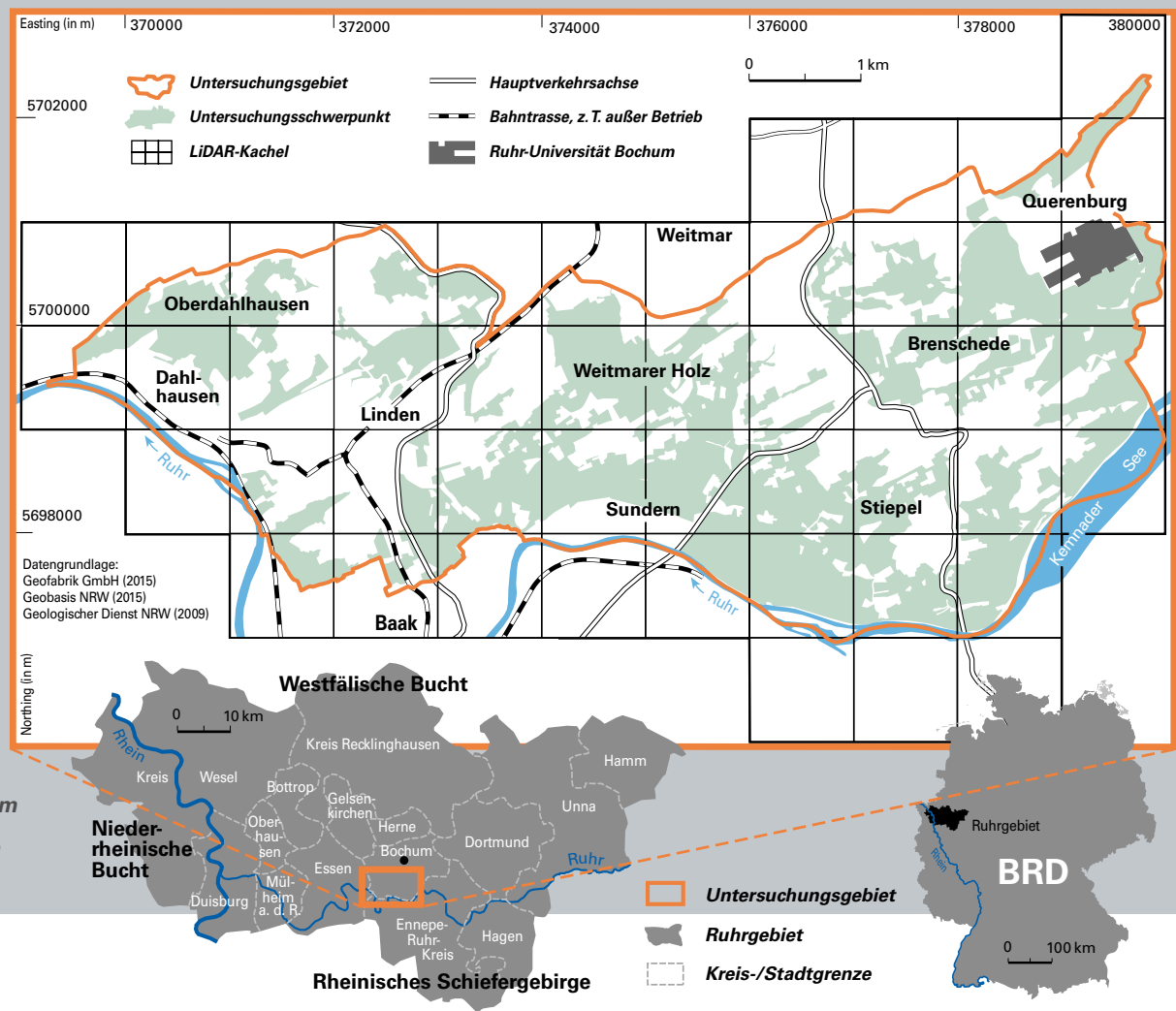


Abb. 12: Konzeptionelle Darstellung des methodischen Vorgehens

- Es wurden ebenso die bergbaubedingten Vollformen (Halden), alleinstehend oder als Begleitformen von abflusslosen Senken (Hohlformen), mit bestimmten geometrischen Eigenschaften und/oder existierenden Bereichen ohne Oberflächenabfluss (0-Akkumulation) definiert.
- Des Weiteren fand eine visuelle Betrachtung des digitalen Geländemodells mit verschiedenen Darstellungsoptionen statt. Damit sollten bis dahin noch nicht identifizierte Hohl- und Vollformen gefunden und bereits detektierte klassifiziert werden (Abb. 12).

Die Validierung der Ergebnisse umfasste in einem weiteren Schritt eine Geländebegehung mit dem Ziel, die detektierten Kleinformen vor Ort zu begutachten. Für die Validierung wurden zusätzlich folgende kartographische Informationsquellen verwendet:

- *Informationssystem Geologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes 1 : 10 000* [IS RK 10 KO] (Geologischer Dienst NRW 2009)
- *Digitale Topographische Karte im Maßstab 1 : 25 000* (DTK 25) (der Größe des Untersuchungsgebietes entsprechend) und die digitalisierten Kartenblätter 4508 Essen und 4509 Bochum (Geobasis NRW 2015)
- *Topographische Karten im Maßstab 1 : 25 000* (TK 25; Geobasis NRW 2015)
- *Deutsche Grundkarte 1 : 5 000* (DGK 5; Stadt Bochum, Vermessungs- u. Katasteramt 2008)



4.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet im Süden der Stadt Bochum hat eine Größe von 2 989 ha und liegt an der Ruhr. Es umfasst die Stadtteile Dahlhausen, Linden, Weitmar, Sundern, Brenschede, Stiepel und Querenburg (Abb. 13). Im Westen, Südwesten, Süden und Südosten wird es von der Bochumer Stadtgrenze und der Ruhr begrenzt. Im Norden wird es im Wesentlichen durch Hauptverkehrsachsen von den dicht bebauten Stadtteilen Richtung Stadtzentrum getrennt. Zwischen seinen bebauten Bereichen finden sich mehr oder weniger große, zusammenhängende Waldgebiete und landwirtschaftlich genutzte Flächen. Das Relief ist mancherorts durch kleinere Gerinne zerschnitten.

4.2 Vorbereitende Arbeitsschritte

4.2.1 Prozessierung des digitalen Geländemodells

Ein digitales Geländemodell (DGM) enthält ausschließlich die Topographie. Um dieses aus LiDAR-Punktdaten konstruieren zu können, werden nur die sogenannten ground returns benötigt. Die im Projekt einzig weiterverwendete Kategorie der ground returns enthält keine Oberflächenstrukturen wie Vegetation oder Gebäude, sondern nur last-pulse-Bodenpunkte, also nur die zuletzt zurückkommenden Signale (= tiefste Stelle) eines Laserimpulses. Zur Identifikation von Hohl- und Vollformen wurden die dreidimensionalen last-pulse-Bodenpunkte in ein DGM mit 0,5 m Rasterauflösung (entsprechend der Lagegenauigkeit der Daten) überführt. Hierfür wurde die Natural-Neighbor-Interpolation genutzt. Bei diesem Verfahren wird der Raum, in dem die xyz-Punktwolke liegt, über Kanten in Regionen unterteilt. Die zu-

geordneten Bereiche innerhalb einer abgegrenzten Region sind zu keinem anderen Punkt näher gelegen. Diese Interpolationsmethode wurde bereits in anderen Untersuchungen verwendet (vgl. FILIN & BARUCH 2010: 582; FROESE & MEI 2008: 1130 u. a.) und ist nach BATER & COOPS (2009: 289) wegen ihres niedrigen Fehlerbereichs besonders gut für LiDAR-generierte Geländemodelle geeignet.

4.2.2 Bereinigung des Datensatzes

Nach der Festlegung des Untersuchungsgebietes und der Erzeugung des digitalen Geländemodells mussten die entsprechenden Daten zunächst für die geplante LiDAR-gestützte Relieffanalyse im GIS vorbereitet werden. Die folgenden Arbeitsschritte dienten dazu, die Wahrscheinlichkeit für Fehlidentifikationen möglichst gering zu halten.

Zunächst ist davon auszugehen, dass altbergbaubedingte Kleinformen hauptsächlich in bewaldeten Gebieten, zum Teil auch auf oder in der Nähe von landwirtschaftlich genutzten Flächen, erhalten und zu erkennen sind (GANTENBERG & WÜHRL 2006: 10; BEIER 2003: 31). In besiedelten Gebieten auftretende Tagesbrüche werden schnellstmöglich verfüllt. Die Eingrenzung der zu untersuchenden Bereiche innerhalb des Untersuchungsgebietes erfolgte auf Grundlage der Digitalen Topographischen Karte im Maßstab 1 : 25 000 (DTK 25) und der frei zugänglichen OSM (OpenStreetMap)-Shape-Datensätze der Geofabrik GmbH (2015). Zur Bearbeitung im GIS wurden unbebaute Gebiete flächenhaft abgegrenzt (Abb. 13). Zudem wurden große Hauptverkehrsachsen ausgeschlossen, sodass letztendlich nur noch vegetationsbedeckte Bereiche zum Schwerpunkt des Untersuchungsgebietes gehörten. In einem weiteren Schritt wurden sämtliche Fließgewässer abgegrenzt und danach Senken, welche in einem Abstand von 5 m (vgl. DIKAU 1989: 52) zu ihnen detektiert wurden, aus der Datenbank entfernt. So sollten Fehlidentifikationen, beispielsweise die Detektion von Senken in Form von Teichen, vermieden werden. Noch fehlende Fließgewässer wurden mithilfe der DTK 25 und des DGMs nachträglich als Segmente (Linien-Features) in das GIS eingepflegt (Abb. 14).

Abb. 14:
Abgrenzung der Gerinnesegmente im Untersuchungsgebiet. Senken, die innerhalb einer 5-m-Pufferzone der Fließgewässer lagen, wurden später aus dem Senken-Datensatz entfernt.

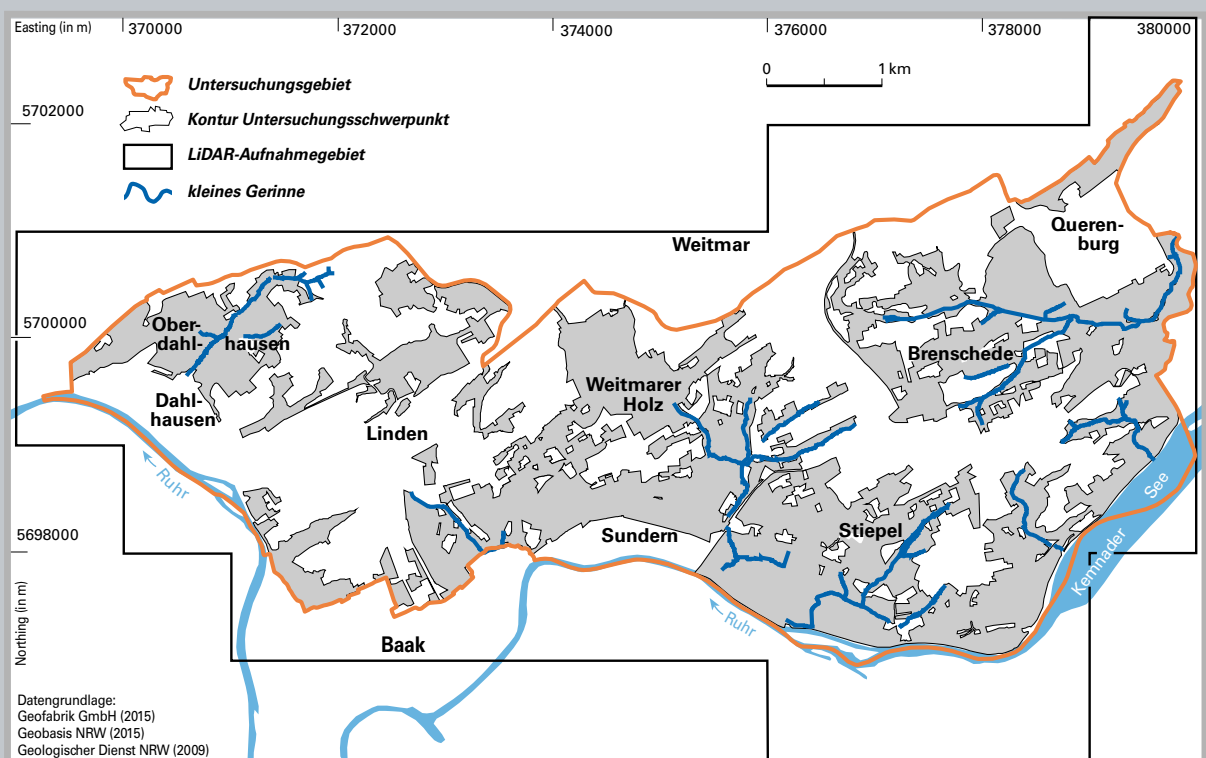
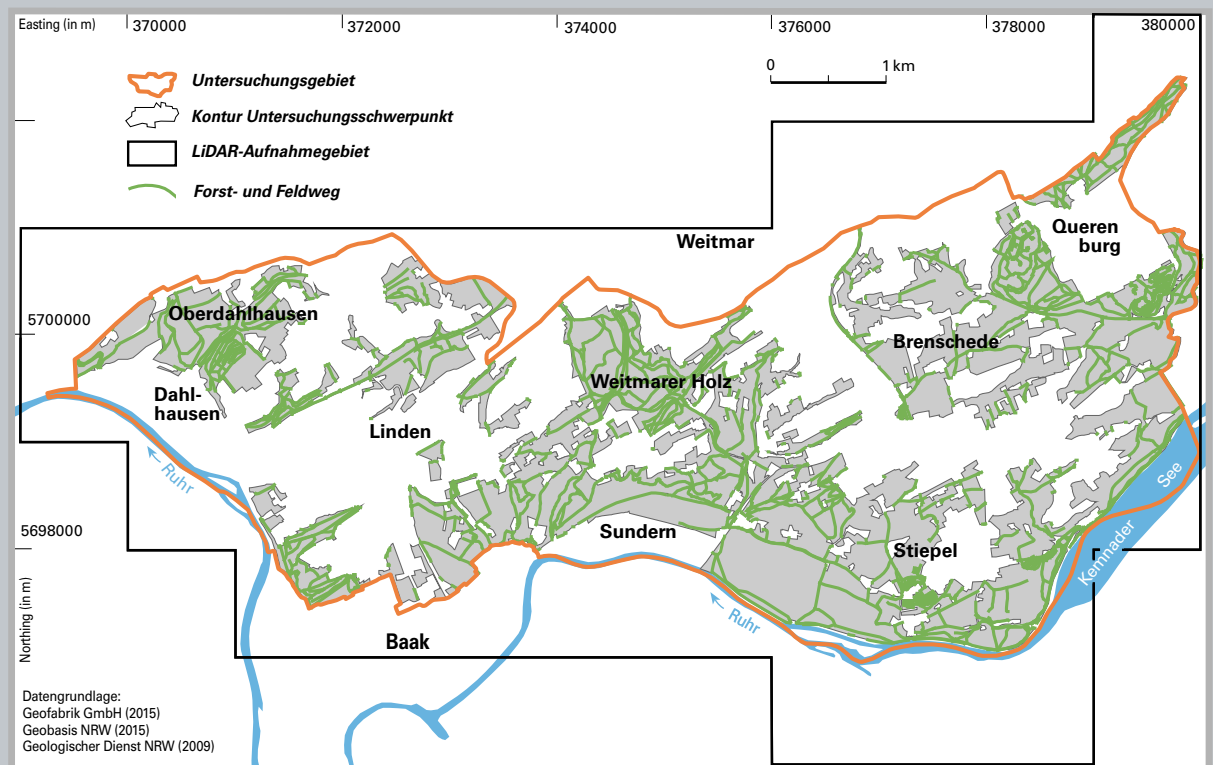


Abb. 15:
Abgrenzung der
Wegsegmente im
Untersuchungs-
schwerpunkt.
Senken, die inner-
halb einer 5-m-
Pufferzone der
Wege lagen,
wurden später
aus dem Senken-
Datensatz entfernt.



Auf derselben Datengrundlage wurden zudem bekannte größere Wasserreservoirs aus dem Datensatz gelöscht. Senken in der Nähe von Wegen wurden ebenfalls aus dem späteren Senken-Datensatz eliminiert.

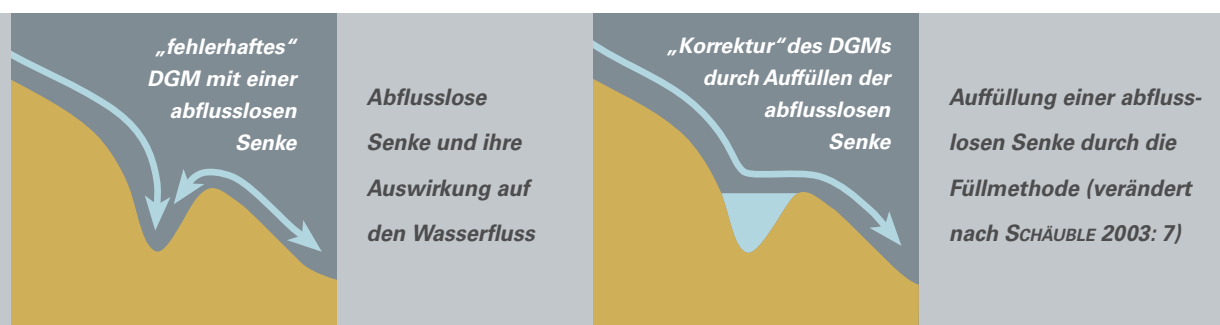
Im Untersuchungsgebiet findet man überwiegend Feld- und Waldwege, zum Teil aber auch tras-
sirierte Straßen. Alle Verkehrswege wurden abgegrenzt und eine 5-m-Pufferzone um die Linien-Fea-
tures erstellt (Abb. 15). Hohlformen innerhalb dieser Zone wurden als durch Verkehrswege oder
deren Bau beeinflusst definiert und aus dem Datensatz entfernt (vgl. Kap. 4.3.1).

4.3 Computergestützte Detektion bergbaubedingter Hohlformen im digitalen Geländemodell

4.3.1 Hohlformdetektion mittels Senkenfüllung im digitalen Geländemodell

DOCTOR & YOUNG (2013: 453 ff.) haben eine hydrologische Methode für geographische Informati-
onssysteme entwickelt, um abflusslose Senken in einem DGM zu identifizieren. Dieses Vorgehen
wurde auch in dieser Arbeit angewendet. Bei der Senkenfüllung bilden Pixel die Senkenbasis, wenn
alle umgebenden Pixel höher liegen und so von dort kein Abfluss entsteht, also eine Höhenun-
gleichheit zur Umgebung herrscht. Diese Bereiche im DGM werden so lange aufgefüllt, bis es in
eine Richtung zum Abfluss kommt, die Hohlform also bis über den Rand gefüllt wurde (Abb. 16).

Abb. 16: Detektion
abflussloser Senken
im DGM mit der
Füllmethode



Nachdem das DGM-Raster gefüllt war,

- 1) wurde aus der Differenz des aufgefüllten mit der des nicht aufgefüllten Rasters die Füll-differenz berechnet. Auf diese Weise konnte neben dem Umriss und der Fläche auch die Tiefe der Senken ermittelt werden.
- 2) wurden aus diesen erkannten Senken jene aussortiert, die sich in einer Entfernung von bis zu 5 m zu den segmentierten Weg- und Gerinne-Elementen oder darauf befinden (DIKAU 1989: 52; FILIN & BARUCH 2010: 582). Im Untersuchungsgebiet werden zum Beispiel mehrere Bäche unterirdisch fortgeführt. An diesen für die hydrologische Fließberechnung künstlichen Barrieren können fälschlicherweise abflusslose Senken erkannt werden. Ungenauigkeiten in den LiDAR-Daten oder durch die Interpolation bedingte Fehler können ebenfalls zu Fehl-identifikationen führen.
- 3) wurden darüber hinaus Senken, die entweder in ihrer Fläche zu groß oder zu klein waren, aus der Datenbank entfernt. Dazu gehörten Senken, die nach DIKAU (1989: 52) nicht den Formentypen des Mikroreliefs entsprechen, also größer als 100 m² oder kleiner als 0,25 m² waren.
- 4) wurden die verbleibenden Pixel anschließend in Polygon-Features konvertiert, die ihrer Größe und Form entsprechen (vgl. DOCTOR & YOUNG 2013: 454).

4.3.2 Abgrenzung wahrer von falschen Senken

Um im DGM wahre Senken wie Tagesbrüche oder Pingen von zahlreichen kleinsten Depressionen (falsche Senken), die unter anderem durch Ungenauigkeiten in den LiDAR-Daten, Interpolationsfehler oder ein fehlerhaftes Höhenmodell abgebildet werden, unterscheiden zu können, wurden sie nach einem von RAHIMI & ALEXANDER (2013: 474 f.) erprobten Schwellenwert selektiert. Der in einem Karstgebiet ermittelte Wert basiert auf zwei morphometrisch erfassten Hohlform-Typen:

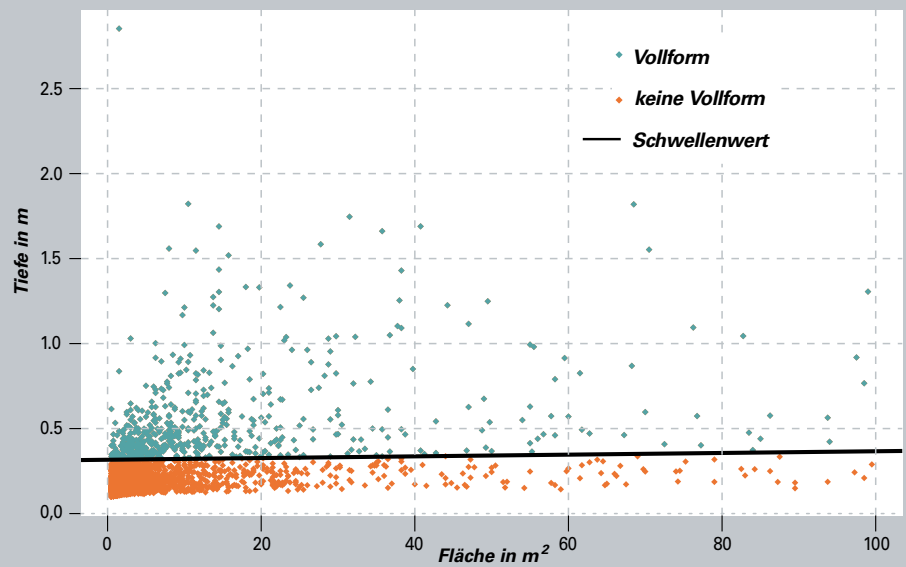
1. Hohlformen mit einer Tiefe von mindestens 90 % der Tiefe der im Feld kartierten flachsten Hohlform und
2. Hohlformen mit einem Tiefen-Flächen-Verhältnis von mindestens 90 % des Verhältnisses, welches die im Feld kartierte Hohlform mit dem geringsten Tiefen-Flächen-Verhältnis besitzt

Verbindet man die beiden Extremwerte durch eine Linie, ergibt sich ein Bereich oberhalb und ein Bereich unterhalb dieser Geraden. Alle detektierten Hohlformen unterhalb dieser Linie, also unterhalb des Schwellenwertes, können, da sie nicht die Mindestanforderungen des Tiefen-Flächen-Verhältnisses erfüllen, aus dem Datensatz entfernt werden. Der Schwellenwert (RAHIMI & ALEXANDER 2013: 475) kann mit der folgenden Funktionsgleichung beschrieben werden:

$$y = 0,0005x + 0,3165$$

x = Fläche der Senke, y = Tiefe der Senke

Abb. 17: Schwellenwert (nach RAHIMI & ALEXANDER 2013: 474) nach Tiefen-Flächen-Verhältnis zum Ausschluss nicht anthropogener Hohlformen. Senken (bzw. Hohlformen) mit einer geringeren Tiefe als 31,65 cm werden aussortiert. Der Schwellenwert steigt mit zunehmender Fläche um den Faktor 0,0005.



Dadurch werden Hohlformen mit einer kleineren Tiefe als 31,65 cm grundsätzlich aussortiert. Dieser Schwellenwert steigt mit zunehmender Fläche für die Senken um den Faktor 0,0005 an (Abb. 17).

Die Anwendbarkeit des auf Karstverbrüchen basierenden Schwellenwertes ist aufgrund der sehr ähnlichen Verbruchentwicklungen und -bilder von Dolinen und bergbaubedingten Hohlformen möglich (PÉNTÉK & VERESS & LÓCZY 2007: 26 f.; MEIER, G. & MEIER, J. 2007: 97 u. 102; vgl. auch Kap. 3.1.3 u. Abb. 8).

Der Schwellenwert ist, bevor er großflächig auf das Untersuchungsgebiet angewendet wurde, in einem Trainingsgebiet in Dahlhausen getestet worden (Abb. 18). Dabei bestätigte sich seine generelle Eignung für die Unterscheidung wahrer und falscher Senken. Mit diesem methodischen Ansatz konnten anthropogene Hohlformen identifiziert und von kleinen Geländeunebenheiten abgegrenzt werden.

Abb. 18:
Trainingsgebiet zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Schwellenwertes in Bochum-Dahlhausen. In einer Geländebegehung fand zudem eine Validierung jener Kleinformen statt, die nach Anwendung aller Abgrenzungsmethoden (Weg-/Gerinnesegmente/Schwellenwert) übrig blieben.

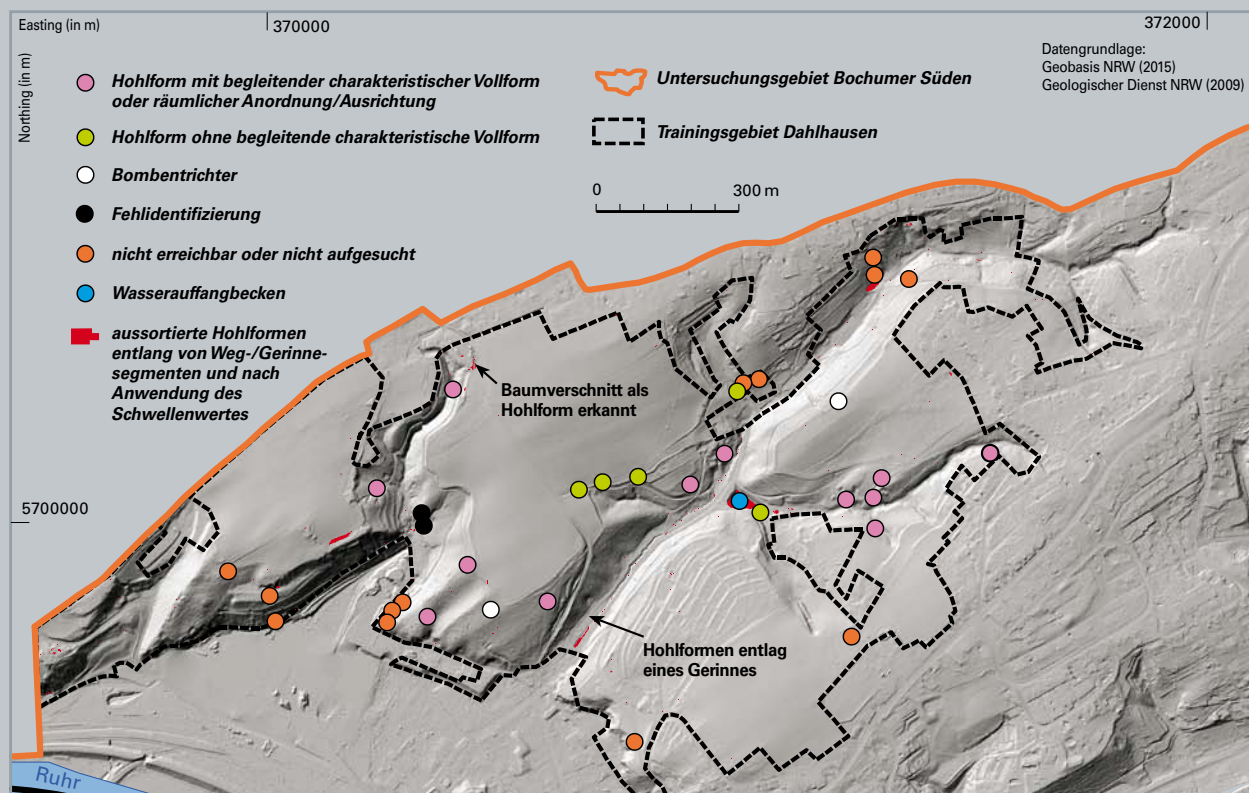
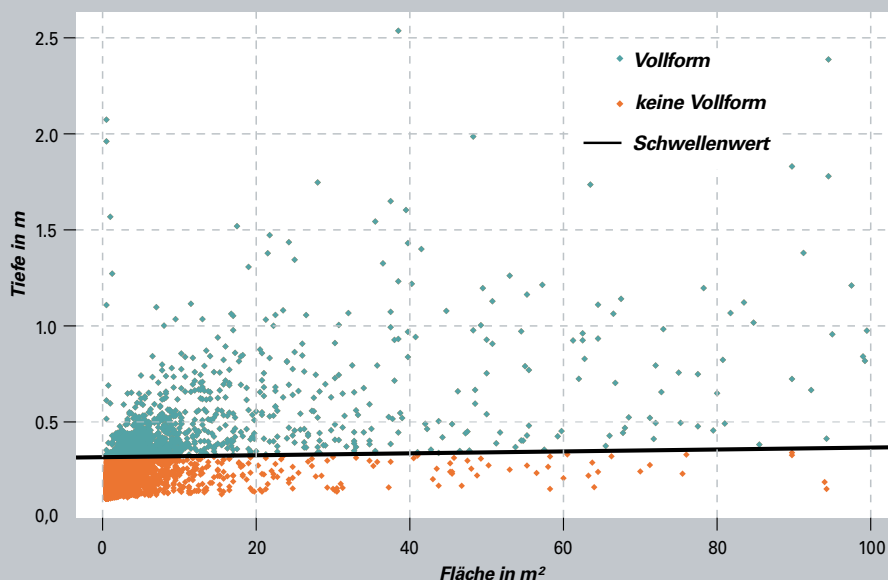


Abb. 19: Schwellenwert (nach RAHIMI & ALEXANDER 2013: 474) nach Höhen-Flächen-Verhältnis zum Ausschluss nicht anthropogener Vollformen. Vollformen mit einer geringeren Höhe als 31,65 cm werden aussortiert. Der Schwellenwert steigt mit zunehmender Fläche um den Faktor 0,0005.



4.4 Computergestützte Detektion bergbaubedingter Vollformen im digitalen Geländemodell

4.4.1 Vollformdetektion mittels Senkenfüllung im invertierten digitalen Geländemodell

Abb. 20:
a) Berechnung des Fließverhaltens nach den Höhenunterschieden im DGM

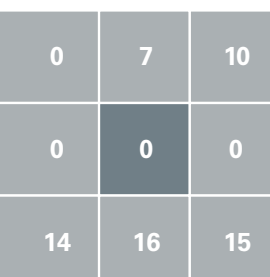


Die computergestützte Detektion bergbaubedingter Vollformen verlief nach einem nahezu identischen Schema wie die von Hohlformen. Zur Ermittlung von anthropogenen Vollformen wurde zunächst das Raster der Geländeoberfläche invertiert. Diese Umrechnung ist nötig, da sich die nachfolgenden Arbeitsschritte nicht von denen aus Kapitel 4.3.1 unterscheiden. Das invertierte DGM wurde demzufolge über die Füllung von Senken aufgefüllt und anschließend das Differenzraster aus gefülltem und nicht gefülltem (invertiertem) DGM berechnet. Bei den auf diese Weise erkannten „Senken“ handelt es sich in der Realität um Vollformen. Das weitere methodische Vorgehen entspricht den Schritten 2 – 4 aus Kapitel 4.3.1.

Da sich der Schwellenwert im Testgebiet generell als gutes Maß für die Unterscheidung von wahren und falschen Senken (bzw. invertierten Vollformen) erwiesen hat, wurden auch die detektierten Vollformen einer Selektion nach ihrem Tiefen-Flächen-Verhältnis (in Wahrheit Höhen-Flächen-Verhältnis) unterzogen (Abb. 19).

4.4.2 Vollformdetektion mittels Abflussakkumulationsberechnung

b) In den höchstgelegenen Bereichen gibt es keine Abflussakkumulation.



Da davon ausgegangen wurde, dass kleinformatige Haldenkörper in ihrer Form (auch im GIS) weniger klar definiert sind als Hohlformen (vgl. Kap. 3.1.2), wurde die Detektion bergbaubedingter Vollformen durch eine zweite methodische Vorgehensweise ergänzt.

Zur Identifizierung der Vollformen (Halden, Kraterwälle) im GIS wurde angenommen, dass diese einen Bereich umfassen, in dem keine Abflussakkumulation stattfindet (0-Akkumulationsfläche). Wenn es um ein Pixel kein umgebendes höher gelegenes Pixel gibt, dann gibt es in diesem Bereich keine Abflussakkumulation (Abb. 20). In den obersten Bereichen von Vollformen ist dies der Fall.

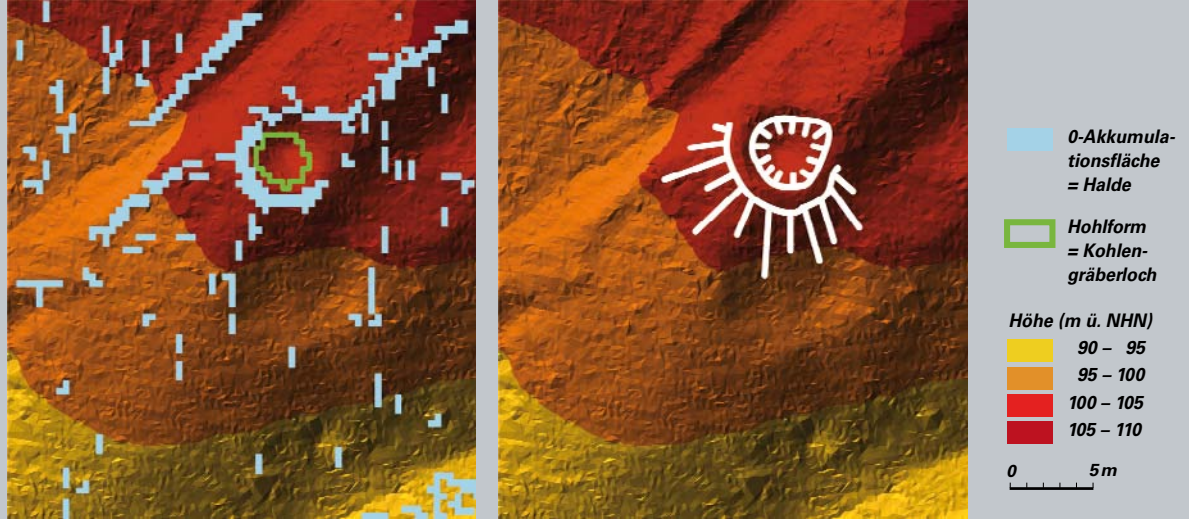


Abb. 21: Klassifikation auf Grundlage des geschummerten DGMs, der 0-Akkumulationsflächen und der Hinzunahme gefüllter Senken

Das daraus interpretierte Kohlengräberloch mit Halde: Zu erkennen ist die hangabwärts gelegene Haldenfläche. Jedoch stellt die Berechnung der 0-Akkumulationsflächen zum Beispiel auch Grate, Wege und andere punktuelle Formen (Bodenrauigkeit) dar.

Die 0-Akkumulationsflächen wurden in einem GIS aus der Geländeneigung und der sich daraus ergebenden Abflussrichtung flächendeckend berechnet. Nach Reklassifizierung der Ergebnisse in 0-Akkumulation und „Rest“ wurden die 0-Akkumulationsflächen mithilfe lagebezogener Abfragen selektiert (Abb. 21).

Für die Selektion der 0-Akkumulationsbereiche musste zunächst eine Regel definiert werden. Mehrere bereits bekannte Pingen im Weitmarer Holz und in Oberdahlhausen dienten hierfür als Referenz. Durch eine visuelle Bestimmung und Abmessung im GIS wurden der kleinste und der größte Abstand einer zusammenhängenden 0-Akkumulationsfläche von einer Pinge ermittelt. Daraus ergaben sich ein Minimalabstand zwischen detektierter Hohlform und Halde von 0,5 m und ein Maximalabstand von 3 m. Nur 0-Akkumulationsflächen innerhalb dieses Bereiches wurden auf ihre räumlichen Beziehungen mit den Hohlformen hin untersucht. Alle 0-Akkumulationsflächen, die nicht den Richtwerten entsprachen, wurden aus dem Datensatz entfernt.

4.5 GIS-gestützte visuelle Analyse des digitalen Geländemodells hinsichtlich bergbaubedingter Hohl- und Vollformen

Mit einer rein visuell durchgeführten DGM-Analyse (unter Verzicht auf computergestützte Berechnungen wie in Kap. 4.3 – 4.4.2) wurden nun die bereits detektierten Hohl- und Vollformen nach dem Merkmalskatalog (Kap. 3.1) unterteilt. Dies diente der Ergänzung des Datensatzes bergbaubedingter Hinterlassenschaften. Kleinformen, welche durch die Füllmethode und die Abflussakkumulationsberechnung noch nicht identifiziert werden konnten, sollten so nachträglich erfasst werden.

Bei der visuellen Analyse wurden die Hohl- und Vollformen mithilfe des DGMs und seiner Darstellungsoptionen bereits detektierter Hohl- und Vollformen und der 0-Akkumulationsflächen in vier Klassen unterteilt:

1. Hohlformen mit begleitenden Vollformen
2. Hohlformen ohne oder mit nicht charakteristischen begleitenden Vollformen
3. Hohlformen mit kranzartig umgebenden Vollformen und unstrukturierter räumlicher Anordnung
4. Fehlidentifikationen

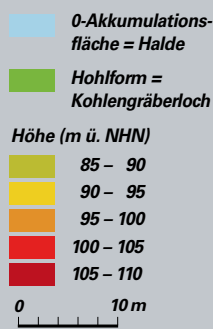
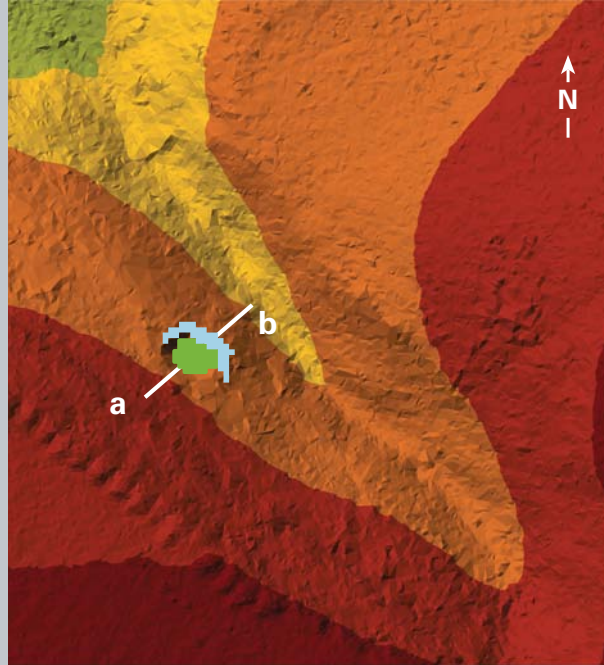
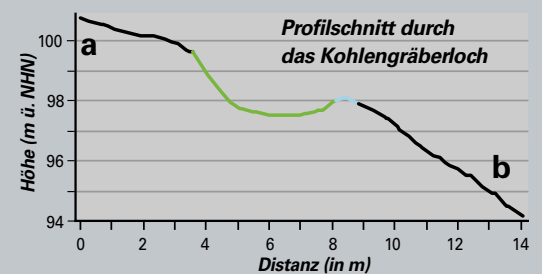


Abb. 22: Visuelle
Klassifikation im
LAS-Dataset (DGM)
auf der Grundlage
von Indizien



a) Mittels Füllmethode detektierte Hohlform und
0-Akkumulationsfläche: Gut zu erkennen ist die
hangabwärts aufgeschüttete Halde.



b) Profilschnitt zur Bestätigung der Annahme aus a)



c) Dreidimensionale Ansicht des Kohlengraberlochs:
Auch hier ist die hangabwärts gelegene Zungen-
halde gut zu erkennen.

Das verwendete DGM liegt im Programm ArcGis-ArcMap unter anderem in Form eines LAS-Datasets (LAS = Dateiformat zum Speichern von luftgestützten LiDAR-Daten) und als interpoliertes Raster vor. Die Verwendung eines LAS-Datasets in ArcMap ermöglicht zum Beispiel das schnelle Anzeigen und Untersuchen von LAS-Dateien und die Darstellung von xyz-Punktwolken oder TIN-basierten Oberflächen (TIN = triangulated irregular network). Die Klassifizierung und Detektion weiterer noch nicht identifizierter Hohl- und Vollformen wurde hauptsächlich mit den im LAS-Dataset integrierten Tools durchgeführt. Wichtige Funktionen sind:

- die mithilfe des LAS-Datasets darstellbare Geländeneigung und Ausrichtung des Gefälles
- die schattenplastische Darstellung des Geländes durch Schräglichtschattierungen (Schummerung)
- das Anzeigen von Profilschnitten und die Möglichkeit zur Darstellung eines überhöhten Reliefs
- die Anwendung unterschiedlicher perspektivischer Ansichten und Darstellungsoptionen der Geländeoberfläche (z. B. Höhenlinien, triangulierte Flächen)
- die Messung von Höhen und Entfernungen
- die dreidimensionale Darstellbarkeit von ausgewählten Ausschnitten des DGMs

Bei der Klassifizierung bergbaubedingter Hohl- und Vollformen wurde darauf geachtet, ob eine Halde oder ein Kraterwall im unmittelbaren Bereich der Senke aus den 0-Akkumulationsflächen zu erkennen ist (Abb. 21). Zur Identifizierung wurden zusätzlich die Geländeneigung und die -richtung herangezogen, um zu sehen, ob die 0-Akkumulationsfläche ober- oder unterhalb der Senke liegt. Im Fall von Halden sollten sich diese idealtypisch bei geneigtem Gelände halbkreis- oder kranzartig unterhalb der detektierten Hohlform befinden (vgl. Kap. 3.1 u. Abb. 10).

In manchen Fällen wurde zur besseren Unterscheidbarkeit bezüglich Fehlidentifizierungen oder Bombentrichter auf Profilschnitte und 3D-Ansichten zurückgegriffen (s. Abb. 22). Das in der Abbildung 22 dargestellte Kohlengraberloch ist aus GANTENBERG & WÜHRL (2006: 36) bekannt.

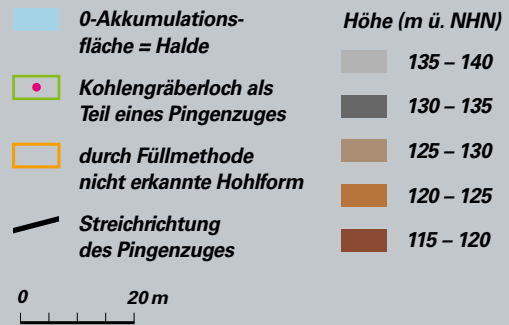
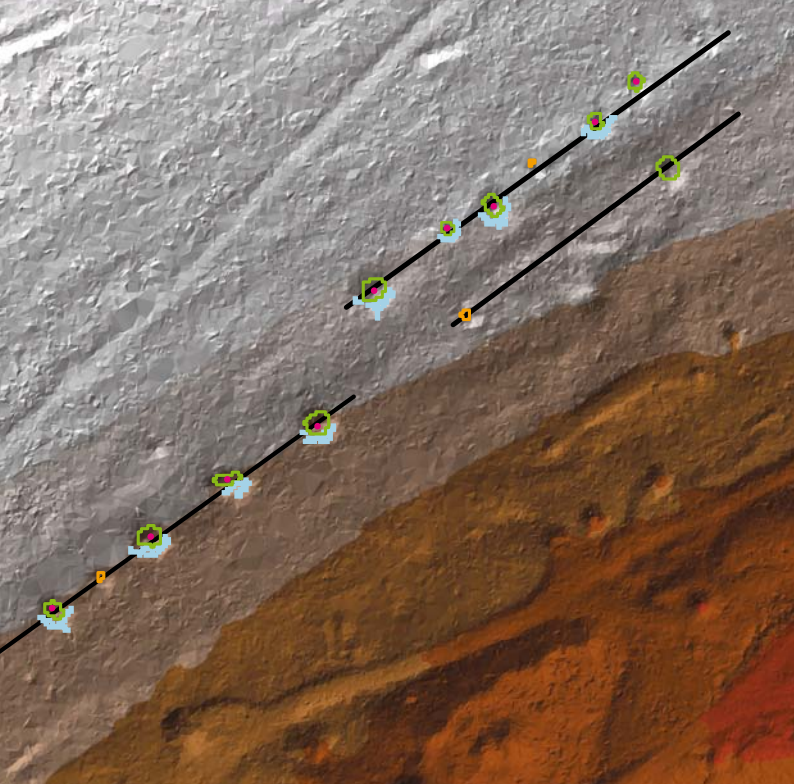


Abb. 23: Auswahl perschnurartig in NE-Richtung aufgereihter Hohl- und Vollformen: Die räumliche Anordnung und die hangabwärts gelegenen 0-Akkumulationsflächen ließen eine eindeutige Klassifizierung als Kohlengräberlöcher, die Teil eines Pingenzuges sind, zu.

Eine linienhafte Anordnung der Hohl- und Vollformen erlaubt Rückschlüsse auf Pingenzüge (Abb. 23). An einigen Stellen konnten dadurch in der Nähe liegende, nicht detektierte Senken ausfindig gemacht werden.

Senken, die an künstlichen Barrieren detektiert wurden, oder an Steilhängen fehlerhaft erkannte Hohlformen wurden in der Klasse Fehlidentifikation zusammengefasst, ebenso Hohl- und Vollformen, deren Form stark von den in Kapitel 3.1 beschriebenen Eigenschaften abwich (Abb. 24). Um diese Fehlidentifikationen zu verifizieren, wurden Luftbilder von Google Maps und Geobasis NRW (2015) herangezogen. So wurden beispielsweise Senken an künstlichen Barrieren oder ein Wasserrückhaltebecken erkannt.

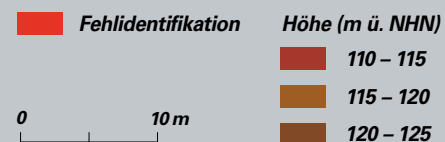
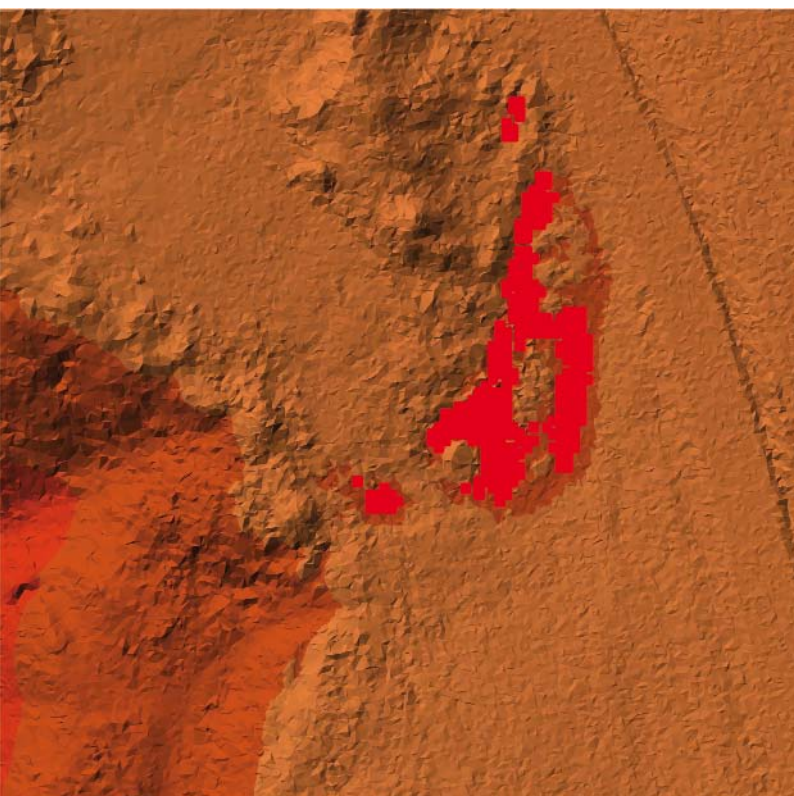


Abb. 24: Beispiel einer Fehlidentifikation: Die Form der detektierten Senke weicht stark von den katalogisierten Formen ab. Bei der erfassten Hohlform handelte es sich tatsächlich um aufgehäuften Baumverschnitt.

Tabelle 2 :

Ergebnisse der LiDAR-gestützten Detektion von Hohlformen durch die Füllmethode und anschließende Filtervorgänge zum Ausschluss fehlerhafter Senken

Ausschluss von Hohlformen durch Beeinflussungen	verwendeter Filtermechanismus	Anzahl Hohlformen	prozentualer Anteil (%)
Untergrenze	0,25 m ²	8 998	54
Obergrenze	> 100 m ²	226	1
Fließgewässer	5-m-Puffer	1 262	8
Straßen	5-m-Puffer	447	3
Schwellenwert	$y = 0,0005x + 0,3165$	5 111	31
verbleibende Hohlformen		512	3
total		16 556	100

5 Ergebnisse

Nach der Fülldifferenz-Methode wurden im Untersuchungsgebiet insgesamt 16 556 Hohlformen erkannt. Ein Großteil dieser Senken hatte nur sehr wenige Bildpunkte und eine geringe Tiefe. Die Anwendung der Filtermechanismen für die Entfernung von Hohlformen nahe Straßen und Fließgewässern und des in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Schwellenwertes zur Unterscheidung wahrer und falscher Senken reduzierte die Anzahl der Senken mit einer Tiefe von mindestens 31,65 cm auf 512. Das Ergebnis der verwendeten Filtermechanismen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Bei der digitalen Reliefanalyse wurden im Untersuchungsgebiet 45 756 Vollformen detektiert. Ein großer Anteil wies nur sehr wenige Bildpunkte auf und wurde deshalb aus dem Datensatz entfernt (Tab. 3). Das Filtern der Vollformen nahe Straßen und Fließgewässern und die Anwendung des Schwellenwertes zur Unterscheidung wahrer und falscher Vollformen verringerten die Anzahl um ca. 98 % auf 956 Objekte mit einer Höhe von mindestens 31,65 cm.

Tabelle 3:

Ergebnisse der LiDAR-gestützten Detektion von Vollformen durch die Füllmethode im invertierten DGM und anschließende Filtervorgänge zum Ausschluss fehlerhafter invertierter Senken (Vollformen)

Ausschluss von Vollformen durch Beeinflussungen	verwendeter Filtermechanismus	Anzahl Vollformen	prozentualer Anteil (%)
Untergrenze	0,25 m ²	29 868	65
Obergrenze	> 100 m ²	185	0
Fließgewässer	5-m-Puffer	736	2
Straßen	5-m-Puffer	2 999	7
Schwellenwert	$y = 0,0005x + 0,3165$	11 012	24
verbleibende Vollformen		956	2
total		45 756	100

Tabelle 4:

Fülldifferenzberechnung im invertierten DGM und Anzahl detektierter Hohlformen, die mit der Füllmethode nicht erkannt wurden

Vollformen ohne zunächst erkannte Hohlformen im invertierten DGM		907
Hinweis auf noch nicht detektierte Hohlform	5	keine bergbaubedingte Vollform 902

Von den 956 verbliebenen Vollformen verfügten 907 über keine begleitende Hohlform aus dem Datensatz der detektierten Senken. Während der visuellen DGM-Analyse (Kap. 4.5) haben aus den 907 Vollformen 5 auf bis dahin nicht erkannte Hohlformen hingewiesen (Tab. 4). Der überwiegende Teil (902) der durch die Invertierung des DGMs erfassten Vollformen ist aufgrund von Indizien nach den Kriterien des Formenkatalogs (Kap. 3.1) in Kapitel 4.5 als Fehlidentifikation interpretiert worden.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse aus der Detektion von Vollformen nach der Berechnung der 0-Akkumulationsflächen. Ebenso werden die Ergebnisse der Senkenfüllung im invertierten Oberflächenraster in Bezug auf begleitende Hohlformen dargestellt. Demnach konnte bei 324 von 512 detektierten Hohlformen eine haldenartige 0-Akkumulationsfläche innerhalb eines 3-m-Puffers um die Hohlform erkannt werden. Innerhalb des Puffers sind 40 Vollformen aus der invertierten Senkenberechnung ermittelt worden. Aus diesen beiden Bereichen führten die unterschiedlichen Methoden zur Detektion bergbaubedingter Vollformen zu 19 Überschneidungen.

Im Zuge der visuellen DGM-Analyse wurden die 19 Überschneidungen übereinstimmend als Hohlformen (vermutlich Kohlengräberlöcher oder Kohlengräben) mit begleitenden charakteristischen Vollformen klassifiziert. Von den verbleibenden 21 Hohlformen mit begleitenden Vollformen wurden 20 als Fehlidentifikation und eine als Tagesbruch eingestuft.

Tabelle 5:

Überschneidungen der beiden Methoden zur Vollformdetektion

Hohlformen nach Anwendung des Schwellenwertes		512
Hohlform mit begleitender Vollform (0-Akkumulation)	324	Hohlform mit begleitender Vollform (invertiertes DGM) 40
Überschneidungen	19	Fehler 21 inkl. ein Tagesbruch

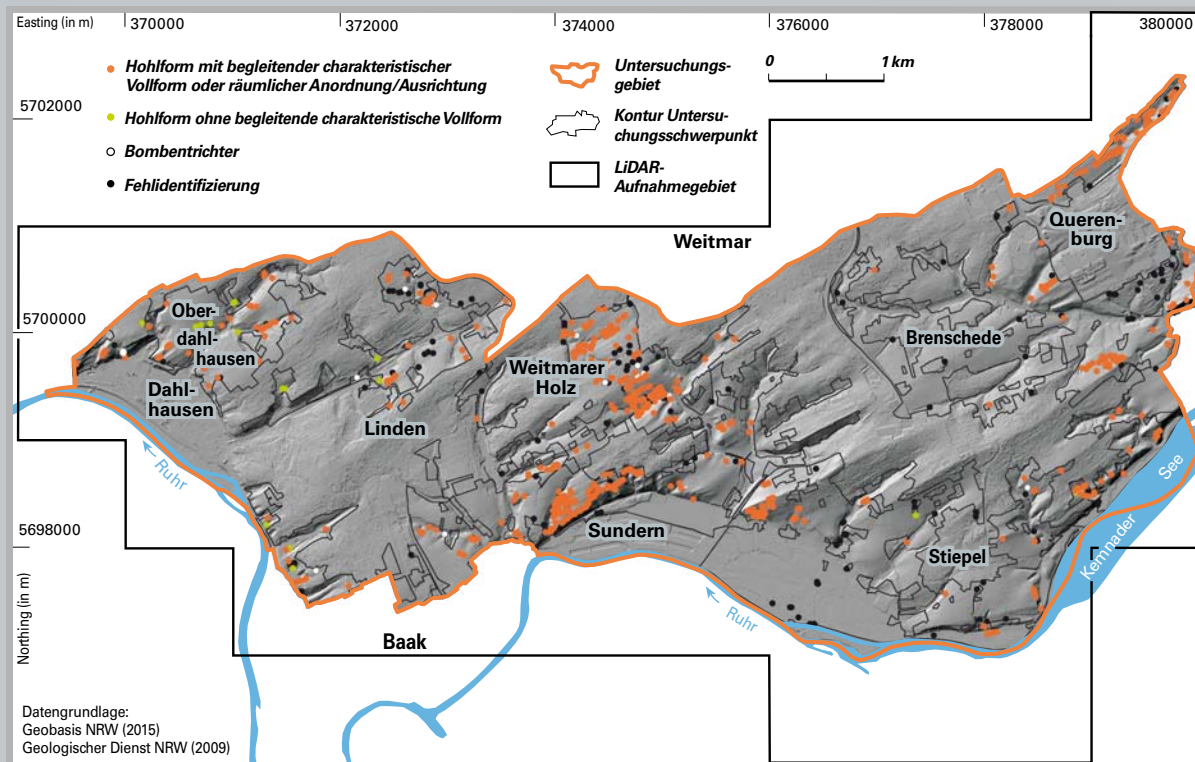
Insgesamt konnten durch alle vier in den Kapiteln 4.3 – 4.5 beschriebenen Methoden zur Detektion bergbaubedingter Kleinformen die folgenden 821 für die Klassifizierung relevanten Hohlformen mit und ohne begleitende Vollformen identifiziert werden:

- 324 Hohlformen mit begleitenden Vollformen oder charakteristischer räumlicher Anordnung bzw. Ausrichtung (Füllmethode)
- 307 Hohlformen mit begleitenden Vollformen oder charakteristischer räumlicher Anordnung bzw. Ausrichtung (zusätzlich bei visueller DGM-Analyse erkannt)
- 22 Hohlformen mit kranzartigen, umgebenden Vollformen und unstrukturierter räumlicher Anordnung
- 18 Hohlformen ohne oder mit nicht charakteristischen begleitenden Vollformen
- 150 Fehlidentifikationen

Die durch die semi-automatische und manuelle DGM-Analyse entdeckten Hohlformen mit umgebenden Vollformen zeigen die typischen formgeberischen Eigenschaften der in Kapitel 3.1 beschriebenen bergbaubedingten Kleinformen (Kap. 3.1.1 u. 3.1.2). Bei 363 der insgesamt 631 detektierten Hohlformen mit begleitenden Vollformen oder charakteristischer räumlicher Anordnung und Ausrichtung handelt es sich wahrscheinlich um Kohlengräberlöcher und/oder Kohlengräben, die zusätzlich in Pingenzügen auftreten. Pingenzüge wurden für die Klassifizierung im GIS so definiert, dass mindestens drei aufeinanderfolgende Hohlformen (mit Vollformen) dem Nordost-Streichen der Kohlenflöze folgend aufgereiht sein müssen und ihr Abstand nicht mehr als 49,9 m messen darf. KNAUF (2012: 56) beziffert den mittleren Abstand von Lichtlöchern beim Stollenvortrieb mit 50 m. Eine genauere Abgrenzungsmöglichkeit zwischen den morphometrisch sehr ähnlichen Kohlengräberlöchern und Lichtlöchern konnte nicht gefunden werden, sodass für die Definition und Klassifikation der detektierten Kleinformen näherungsweise auf den genannten Wert zurückgegriffen werden musste. Im GIS wurden die Hohl- und Vollformen über lagebezogene Abfragen und Nachbarschaftsbeziehungen untersucht und bei zutreffenden Kriterien als Teil eines Pingenzuges identifiziert.

Unter den 307 bei der visuellen DGM-Analyse erkannten Hohlformen gibt es auch einige grabenartige und/oder zum Hang hin offene Strukturen. Wegen nicht definierbarer oder fehlender 0-Akkumulationsflächen wurde bei 18 davon vermutet, dass es sich um Tagesbrüche über verbrochenen Stollen handelt. Die restlichen 22 weisen weder eine linienhafte Anordnung auf, noch zeigen sie ein dem Formenschatz bergbaubedingter Kleinformen entsprechendes Bild. Besonders die umgebenden 0-Akkumulationsflächen haben im Lagebezug zu den Hohlformen kein erkennbares Muster und in sich sehr unregelmäßige Strukturen. Da das Relief in diesem Bereich nahezu eben ist, war die Beurteilung der 0-Akkumulationsflächen deutlich erschwert. Dennoch würde man bei bergbaubedingten

Abb. 25: Ergebnis der LiDAR-gestützten Detektion und Klassifikation bergbaubedingter Kleinformen im Bochumer Süden. Die Bereiche außerhalb der Untersuchungsschwerpunkte waren nicht Bestandteil der LiDAR-gestützten Reliefanalyse.



Reliefformen in flachem Gelände kranzartige Halden mit einem geöffneten Bereich für den An- und Abtransport erwarten. Möglicherweise handelt es sich bei den beschriebenen Formen deshalb um Bombentrichter. Abbildung 25 zeigt die Lage der klassifizierten Kleinformen im Untersuchungsgebiet.

Eine Berechnung der Punktdichte aller detektierten Kleinformen ergab, dass im Bereich des Weitmarer Holzes und an den Südhängen des Baaker Berges die höchsten Werte zu finden sind (Abb. 26).

Abb. 26: Punktdichtemessung (kernel-density) aller klassifizierten Detektionen

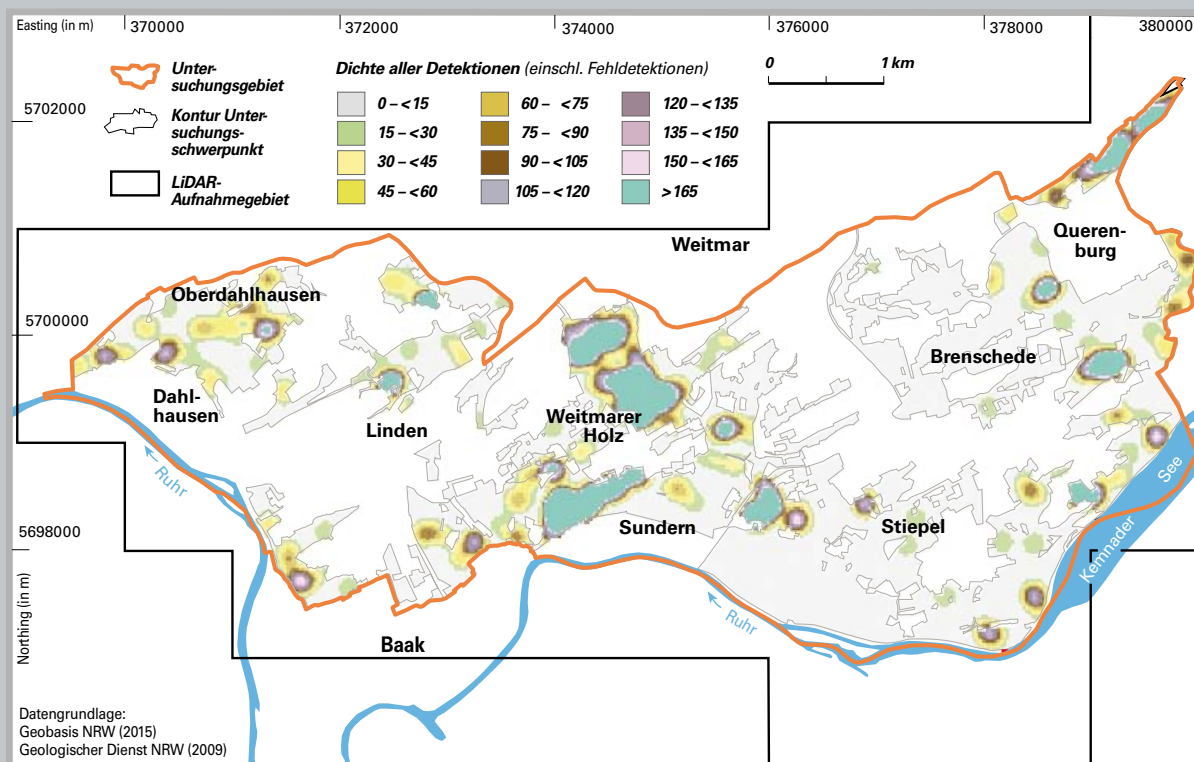


Tabelle 6:

Validierungsmethoden und die Anzahl der dadurch jeweils bestätigten Kleinformen

Viele der Detektionen wurden durch mehr als eine Validierungsmethode erfasst –
dadurch ist die Summe aller validierten Kleinformen größer als die der Detektionen.

Validierungsmethode	validierte Kleinformen	davon einfach validiert	davon mehrfach validiert
DGK 5	55	16	39
TK 25	1	0	1
IS RK 10 KO	511	217	294
Geländebegehung	326	62	264
andere	8	0	8

6 Validierung der Ergebnisse

Für die Validierung der klassifizierten Ergebnisse der LiDAR-gestützten Reliefanalyse hinsichtlich bergbaubedingter Kleinformen wurden mehrere methodische Ansätze verfolgt: Es wurde auf verschiedene digitale Karten, Informationen aus Bergbauwanderführern (z. B. Stadt Bochum 2015) sowie Expertenaussagen zurückgegriffen. Außerdem wurde eine Geländebegehung ausgewählter Bereiche im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Die Ergebnisse der LiDAR-gestützten Reliefanalyse wurden für die Validierung in zwei Klassen eingeteilt: bergbaubedingte Kleinform und nicht bergbaubedingte Kleinform.

Ein erster umfassender Abgleich der Ergebnisse fand mit der Deutschen Grundkarte 1 : 5 000 (DGK 5) statt. Die detektierten Geländeformen wurden dabei hinsichtlich noch bestehender, eindeutiger Fehlidentifizierungen, zum Beispiel auf oder entlang von Straßen, an künstlichen Barrieren oder auf sehr steilen Hängen, überprüft. So konnten zum einen 21 weitere Fehlidentifikationen erkannt und zum anderen alle 150 im Vorfeld als Fehlidentifizierung klassifizierten Detektionen bestätigt werden. Danach wurden die 32 in der DGK 5 eingetragenen kleinförmigen Hohl- und Vollformen im Bereich des Untersuchungsgebietes in das GIS übertragen, um einen Lageabgleich mit den LiDAR-Detektionen durchführen zu können. Aufgrund erkenn- und messbarer Lage-Ungenauigkeiten von bis zu 10 m zu bekannten Hohlformen wurde diese Abweichung als Maß für die lagebezogene Abfrage verwendet. Bei der Validierung wurden des Weiteren Kleinformen, die als Teil eines Pingenzuges klassifiziert wurden, komplett positiv gewertet, wenn eine Hohlform des Pingenzuges eine Übereinstimmung mit einer Hohlform der DGK 5 aufwies. Der Lageabgleich mit den Ergebnissen der digitalen Reliefanalyse ergab insgesamt 55 Übereinstimmungen (Tab. 6).

Beim Ergebnisabgleich mit der digitalisierten Topographischen Karte 1 : 25 000 (TK 25) wurde das gleiche Verfahren angewandt wie bei der DGK 5. Hierbei konnten keine weiteren Fehlidentifizierungen ausfindig gemacht werden. In der TK 25 ist für den Bereich des Untersuchungsgebietes nur eine Hohlform eingetragen. Diese stimmt mit der entsprechenden Detektion aus den LiDAR-Daten überein.

Der Abgleich mit dem Ausstrich der Kohlenflöze des Informationssystems Geologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes 1 : 10 000 brachte insgesamt die meisten Übereinstimmungen (Tab. 6). Allerdings musste aufgrund der relativen Ungenauigkeit der Flözverläufe – diese wurden bei der Erstellung der Karte auf das Niveau der Geländeoberfläche hochprojiziert bzw. konstruiert – ein größerer Toleranzbereich für den Lageabgleich in Kauf genommen werden. Die Abweichung ist einerseits auf den Kartenmaßstab, andererseits darauf zurückzuführen, dass sich die Flözverläufe zwar auf die Karbon-Oberfläche – welche im Untersuchungsgebiet der Geländeoberfläche entspricht – beziehen, jedoch nicht exakt den tatsächlichen Verlauf der Ausbisse wiedergeben. Die höchste gemessene Abweichung eines Flözes von einer bekannten Pinge beträgt 19,88 m. Bei einer durchschnittlichen Flözmächtigkeit von ca. 2 m (u. a. PFLÄGING 1999: 20; DROZDZEWSKI & KOETTER 2008: 291 u. 299) wurden alle detektierten Kleinformen in einer Entfernung von maximal 21,88 m zu den Kohlenflözen als positiv validiert bewertet.

Bei der Validierung der Ergebnisse im Gelände wurde überprüft, ob eine Halde oder ein Kraterwall um die Hohlformen zu erkennen ist. Relativ junge Tagesbrüche konnten anhand von fehlender Vegetation und Laub- bzw. Streuschicht von Kohlengräberlöchern und Bombentrichtern gut unterschieden werden, da Letztere seit mehreren Jahrzehnten im Untersuchungsgebiet nicht mehr neu entstanden sind. Zudem waren in manchen Pingen und auf den Halden Reste von Feinkohle zu erkennen.

Eine weitere Informationsquelle für die Validierung waren ortsansässige Bewohner und ein Mitarbeiter der Forstverwaltung, der für das Untersuchungsgebiet im Bereich Oberdahlhausen zuständig ist.

Während der Geländebegehung konnten 326 bergbaubedingte Kleinformen begutachtet werden (Tab. 6). Besonders in Oberdahlhausen, im Weitmarer Holz, am Baaker Berg, am Henkenberg, im Voßkuhlenbusch, im Lottental, im Kalwes (nahe der Ruhr-Universität Bochum) sowie im Laerholz konnten nahezu alle GIS-Detektionen auch im Gelände bestätigt werden. In Oberdahlhausen haben sich von sieben vermuteten Tagesbrüchen (Hohlform ohne charakteristische Vollform) aus der digitalen Reliefanalyse vier auch im Gelände als Tagesbrüche über verbrochenen Stollen herausgestellt. Einer konnte wegen starker Sturmschäden nicht vor Ort aufgesucht werden, zwei weitere waren zum Zeitpunkt der Geländebegehung bereits wieder verfüllt worden. Die Befragung Ortsansässiger ergab außerdem, dass es sich bei zwei der als bergbaubedingte Kleinform klassifizierten Detektionen tatsächlich um von Kindern und einem Förster gegrabene Löcher handelt. Zudem wies ein Zeitzeuge eine weitere Detektion als einen Bombentrichter aus.

Bei der Geländebegehung in Dahlhausen wurde zufällig ein Tagesbruch unmittelbar nordöstlich des Geländes der Dr. C. Otto Feuerfest Gesellschaft gefunden. Dieser wurde zwar mit der Füllmethode entdeckt, jedoch aufgrund einer fehlerhaften LiDAR-Messung nach der Anwendung des Schwellenwertes ausselektiert. Der Tagesbruch hat einen gemessenen Umfang von 1,6 m und eine gemessene Tiefe von ca. 50 cm.



*Abb. 27: Ein vermutlicher Tagesbruch im Weitmarer Holz:
Gut zu erkennen sind die steil abfallenden Trichterwände
und das Fehlen einer Bergehalde.*

Auch im Weitmarer Holz konnten zahlreiche Detektionen begutachtet werden. Jeweils zwei als Pingen bzw. Bombentrichter klassifizierte Kleinformen wurden wegen vollständig fehlender Haldenbereiche als potenzielle Tagesbrüche angesprochen (Abb. 27). Im GIS war die Beurteilung dieser Formen aufgrund der sehr schwachen Geländeneigung erschwert.

Besonders an den Südhängen des Baaker Berges wurden viele grabenartige und zum Hang hin geöffnete Hohlformen entdeckt (Abb. 28 u. 29). Die im GIS beobachtete, dem Streichen folgende Anordnung konnte im Gelände gut nachvollzogen werden. In einem durch einen kleinen Bach zerschnittenen Tal konnten beidseitig an den Talhängen die (fortgesetzten) grabenartigen Strukturen erkannt werden. Die Ausrichtung der Kohlengräberei und Pingen korreliert mit dem Nordost-Streichen der Kohlenflöze. Die Geländebegehung dieses Gebietes bestätigte einen Großteil aller dort detektierten Kleinformen. Darüber hinaus wurden zwei Lochsteine entdeckt, die einen eindeutigen Hinweis auf die Markscheiden und damit verbundene bergbauliche Aktivitäten geben. Mancherorts fanden sich in unmittelbarer Nähe zu den Hohlformen aus Ziegelsteinen gemauerte Plattformen, teils eingestürzt, teils aber auch gut erhalten (Abb. 29). Vermutlich handelt es sich hierbei um eine Art Rampe zur Lagerung und zum Abtransport von Kohle.

*Abb. 28: Blick von oben auf eine zum Hang hin geöffnete Hohlform
(Vordergrund) mit davor gelagerter Vollform (Bildmitte) am Baaker Berg*



*Abb. 29: Eine zum Hang hin geöffnete Hohlform mit durch
Ziegelsteinmauern begrenzter Plattform im Vordergrund*



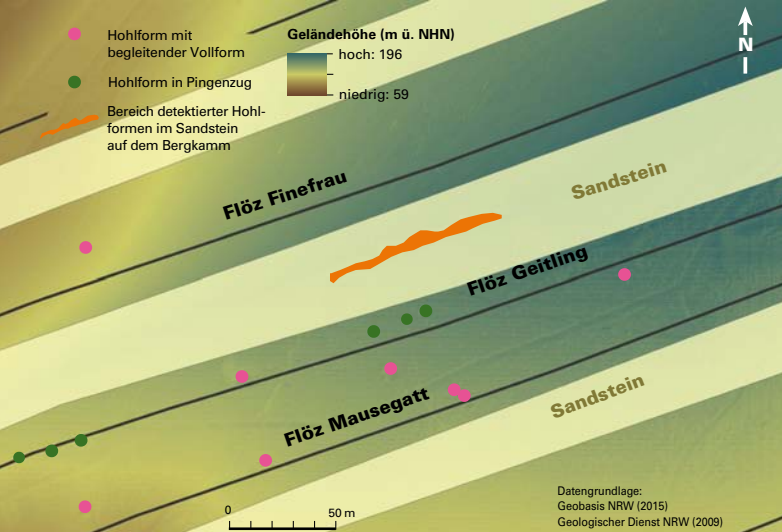


Abb. 30: Detektierte Kleinformen auf dem Henkenberg: Hohl- und Vollformen entlang der Steinkohlenflöze wurden positiv validiert, die Hohlformen im Sandstein hingegen nicht.

Am Henkenberg konnten zahlreiche Kleinformen validiert werden. Vier auf dem Kamm gelegene, eher grabenartige Strukturen erwiesen sich als nicht durch den Steinkohlenbergbau entstandene Formen. An den Bergkämmen findet man im Bochumer Süden meist Sandstein oder Konglomerat. Kohlenflöze und damit Steinkohlen-Grubenbaue sind dort theoretisch nicht zu erwarten. Der Abgleich mit dem Informationssystem Geologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes 1 : 10 000 bestätigte diese Annahme (Abb. 30).

Besonders im Voßkuhlenbusch, dessen Relief von mehreren Pingenzügen und Kohlengraben zerfurcht ist, fanden sich flächendeckend Abbaureste der Kohlengrube. Aufgrund der Größe einer detektierten Hohlform mit begleitender Vollform, des Vorhandenseins befestigter Lagerbereiche und einer Art Zufahrtsrampe wurde im Lottental ein Lichtloch vermutet. Es wurde aber weder im weiteren Verlauf des Projektes durch zum Beispiel historisches Kartenmaterial bestätigt noch während der Geländebegehung.

Viele Pingen, deren Haldenflächen nicht von einer Streuschicht überdeckt waren, wiesen bemooste Bereiche auf (Abb. 31 u. 32). Dies ist ein häufig zu beobachtendes Bild, das unter anderem auch von Dr. Till Kasielke während einer gemeinsamen Geländebegehung bestätigt wurde.

Abb. 31: Eine etwa 1,50 m tiefe Pinge mit bemooster Haldenfläche im Kalwes



Abb. 32: Eine größere Pinge (Fläche ca. 11 m²) mit bemooster Haldenfläche in einem Waldstück in Oberdahlhausen



Tabelle 7:

Übersicht validierter und nicht validierter Kleinformen, ohne Mehrfachzählungen

detektierte Kleinformen	validierte Kleinformen			
gesamt	gesamt	einfach validiert	mehrfach validiert	nicht validiert
671	596	295	301	75

Bergbauwanderführer (z. B. Stadt Bochum 2015) und Informationstafeln (vgl. Tab. 6: Validierungsmethode „andere“) im Untersuchungsgebiet gaben vielerorts Hinweise auf Pingen oder andere Hinterlassenschaften des frühen Steinkohlenbergbaus, oft jedoch ohne einen zahlenmäßigen oder konkreten Lage-Hinweis. Dennoch konnten durch sie acht Kleinformen eindeutig validiert werden.

Mit den beschriebenen Validierungsmethoden konnten in der Summe 596 Kleinformen überprüft werden (Tab. 7). 75 der insgesamt 671 Kleinformen (ohne 150 Fehlidentifikationen) konnten nicht validiert werden.

Die Lage der validierten Kleinformen und eine Gegenüberstellung zu Abbildung 25 sind in Abbildung 33 dargestellt. Eindeutige Fehlidentifizierungen (150) wurden bereits aus dem Datensatz entfernt und sind nicht mehr Bestandteil der Darstellung.

Abb. 33: Ergebnis der Validierung nach der LiDAR-gestützten Detektion und Klassifikation bergbaubedingter Kleinformen im Untersuchungsgebiet: Die Bereiche außerhalb der Gebiete mit Untersuchungsschwerpunkten waren nicht Bestandteil der LiDAR-gestützten Reliefanalyse.

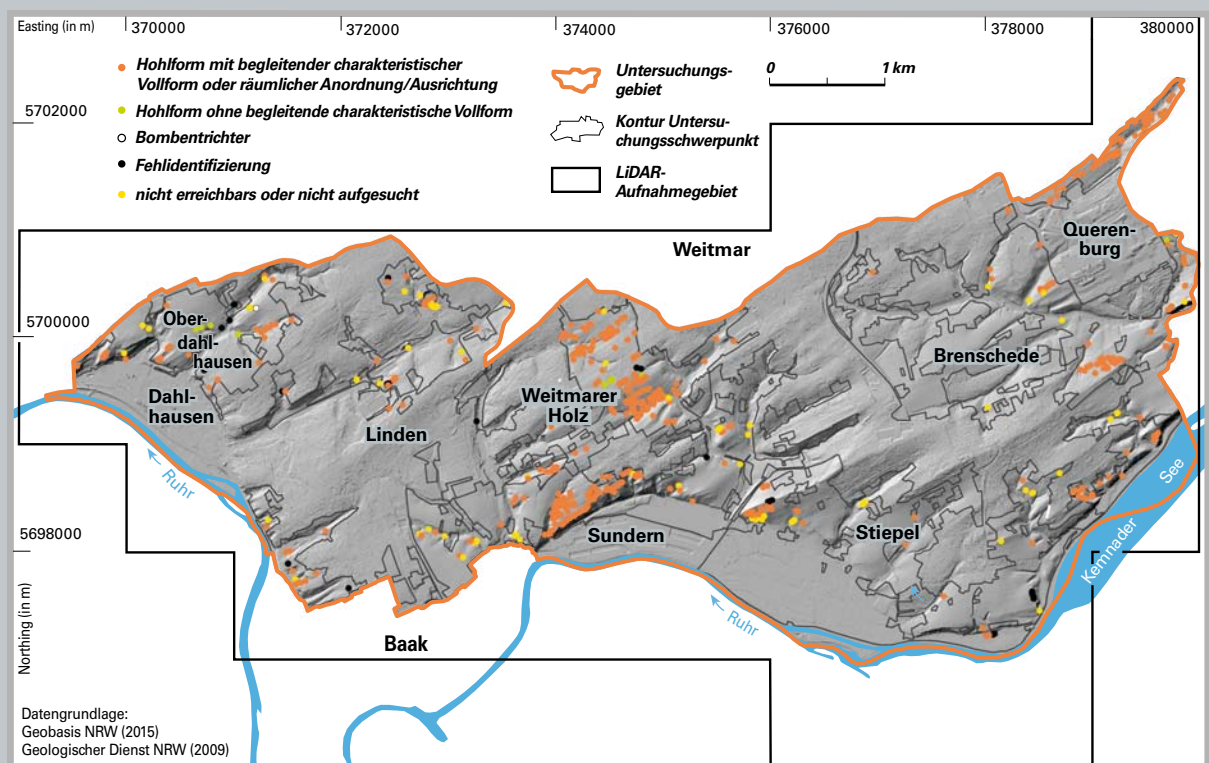


Tabelle 8:

Wahrheitsmatrix auf Grundlage der LiDAR-gestützten Reliefanalyse und der Validierung der Ergebnisse

richtig positiv	rp	bergbaubedingte Kleinform richtig erkannt
richtig negativ	rn	nicht bergbaubedingte Kleinform richtig erkannt
falsch positiv	fp	als nicht bergbaubedingte Kleinform detektiert, jedoch als solche validiert
falsch negativ	fn	als bergbaubedingte Kleinform detektiert, jedoch nicht als solche validiert

	bergbaubedingte Kleinform		nicht bergbaubedingte Kleinform	
positiv	rp	559	fp	29
negativ	fn	7	rn	151

Die Wahrheitsmatrix (Tab. 8) stellt vier mögliche Kombinationen in einer Gegenüberstellung nach den Klassifikationen im GIS und aller Validierungsmethoden dar.

7 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Süden Bochums nach bergbaubedingten (kleinförmigen) Hinterlassenschaften des frühen Steinkohlenbergbaus auf der Grundlage einer LiDAR-gestützten Reliefanalyse untersucht. Dabei sollten die Relikte flächendeckend erfasst und die Eignung der LiDAR-Punktdaten für die spezielle Problematik des oberflächen- und tagesnahen Altbergbaus überprüft werden.

7.1 Eignung der Identifikations- und Validierungsmethoden

7.1.1 Abflusslose Senken (Füllmethode)/0-Akkumulationsflächen

Die Detektion von abflusslosen Senken bzw. anthropogen geschaffenen Hohlformen in waldbestandenen und vegetationsbedeckten Gebieten funktionierte mit der Füllmethode schnell und zuverlässig. Deutlich zeitaufwendiger war die manuelle Analyse und Klassifizierung von Hohl- und Vollformen im DGM.

Bergehalden und Kraterwälle ließen sich im DGM visuell gut bis sehr gut durch die Flächen ohne Abflussakkumulation erkennen. Daher stimmen auch die klassifizierten Ergebnisse der visuellen Interpretation im GIS sowohl mit denen der Geländebegehung als auch mit denen der anderen Validierungsmethoden überein. Jedoch wurden auch zahlreiche Flächen als 0-Akkumulationsflächen identifiziert, bei denen es sich nachweislich nicht um bergbaubedingte Halden oder Kraterwälle handelt. Dazu gehören natürliche Erhebungen, Unebenheiten (Rauigkeit der Geländeoberfläche) und Gebiete mit intensivem Bewuchs, aber auch viele 0-Akkumulationsflächen, die im Gelände nicht nachvollzogen werden konnten. BATER & COOPS (2009: 295 f.) bestätigen, dass LiDAR-Daten bei starker Geländeneigung sowie bei dichter Vegetation zunehmend ungenauer werden, worauf diese

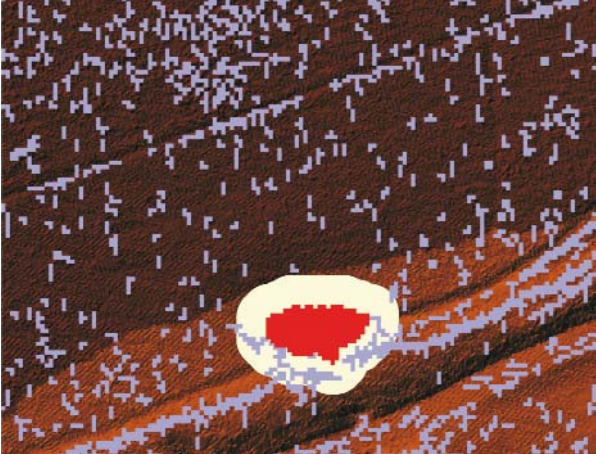


Abb. 34: Auch neben einem Tagesbruch (rot) treten 0-Akkumulationsflächen auf, die entlang eines Feldweges erzeugt wurden. Wegen der fehlenden typischen ring- oder kranzförmigen Haldenfläche wurde diese Hohlform als Hohlform mit unregelmäßiger (nicht charakteristischer) Vollform klassifiziert.

Fehlidentifikationen zurückzuführen sind. Aus diesem Grund wurden 0-Akkumulationsflächen auch im 3-m-Puffer um Senken detektiert, die sich im Nachhinein als Tagesbrüche herausgestellt haben (Abb. 34). An diesem Beispiel wird die Notwendigkeit einer auf Indizien gestützten manuellen Klassifikation in dieser Arbeit deutlich. Die stete Rückversicherung mit den erarbeiteten Charakteristiken bergbaubedingter Kleinformen aus dem Merkmalskatalog (Kap. 3.1) war in diesem Zusammenhang ein unerlässlicher Bestandteil während der Klassifizierung im DGM.

Abb. 35: Bei starker Geländeneigung wird die Senke nicht bis zum oberen Rand gefüllt. Dies kann zu geringen Abweichungen bei der Berechnung der Fläche und Tiefe mit der Füllmethode und anschließender Differenzrasterbildung führen (verändert nach SCHÄUBLE 2003: 13).



Die Detektion von Vollformen mit der Füllung des invertierten Geländeasters führte hingegen zu keinen guten Resultaten. Dies ist auf die weniger klar definierte Form von Haldenflächen im Vergleich zu Hohlformen zurückzuführen. Zudem handelt es sich bei den Haldenflächen wegen ihren morphometrischen und geometrischen Eigenschaften und der Lage am Hang in den allermeisten Fällen um invertierte Hohlformen mit hydrologischem Abfluss.

Der bei der Geländebegehung zufällig entdeckte Tagesbruch wurde mit der Füllmethode als Senke identifiziert. Die im GIS ermittelte Tiefe von 11 cm entsprach jedoch nicht seiner tatsächlichen Tiefe von ca. 50 cm. Durch die Anwendung des Schwellenwertes (vgl. RAHIMI & ALEXANDER 2013) wurde der Tagesbruch ausselektiert. Dieses Beispiel zeigt, dass durch LiDAR-Messungen nicht immer die korrekte Höhe der Oberfläche erfasst wird, vor allem, wenn es sich um sehr kleine Oberflächenformen handelt, eine dichte Vegetationsbedeckung vorhanden ist oder andere Hindernisse die Messung beeinflussen. Wie auch SHAW FAULKNER & STAFFORD & BRYANT (2013: 466) bestätigen, müssen vor dem Hintergrund dieser Ungenauigkeiten leichte Abweichungen aus den Messungen der Datenerhebung von den tatsächlichen Tiefen und Flächen von Hohl- und Vollformen berücksichtigt werden.

Bei der Senkenidentifizierung mithilfe der Füllmethode kann es insbesondere bei starker Geländeneigung zu kleineren Werten hinsichtlich der Fläche und Tiefe einer Hohlform kommen, wie in Abbildung 35 skizziert ist. Dieses Problem ist jedoch eher theoretischer Natur. Bei einer Stichprobe untersuchter Senken konnte in der vorliegenden Arbeit kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. Der zuvor genannte unerkannte Tagesbruch liegt nicht an einem Hang.

7.1.2 Schwellenwert

Der verwendete Schwellenwert zur Selektion wahrer und falscher Hohlformen ist nicht an das Untersuchungsgebiet angepasst. Da aber im Vorfeld nicht genügend Pingen oder Tagesbrüche bekannt waren, die als Referenz für einen angepassten Schwellenwert hätten dienen können, wurde auf den zur Untersuchung von Erdfällen in einem Karstgebiet basierenden Schwellenwert zurückgegriffen. Ein abwei-

chendes Einbruchverhalten des Untergrundes im Vergleich zu Karstgebieten ist denkbar, jedoch nach MEIER, G. & MEIER, J. (2007: 92) nicht zu erwarten. Sie bestätigen, dass das Einbruchverhalten von Tagesbrüchen und natürlich entstandenen Erdfällen in Karstgebieten sehr ähnlich ist und damit auch die Verbruchbilder an der Tagesoberfläche nahezu identisch sind. Abweichungen und Unterschiede würden sich in einer Größenordnung bewegen, die aus den Daten von LiDAR-Messungen kaum zu unterscheiden wären. Es kann festgehalten werden, dass der Schwellenwert von RAHIMI & ALEXANDER (2013) generell geeignet ist, um künstlich angelegte oder entstandene Hohl- und (invertierte) Vollformen von zahlreichen kleinsten natürlichen Unebenheiten im Gelände oder Fehlmessungen/-interpolationen zu unterscheiden. Zur weiteren Absicherung wurden auch vier Hohlformen untersucht, die knapp durch den Schwellenwert aussortiert wurden. Nach gründlicher Kontrolle im Gelände konnte jedoch ausgeschlossen werden, dass es sich bei diesen um anthropogene Senken handelt. Auf der Grundlage der vorliegenden Arbeit wäre nun eine an den Untersuchungsgegenstand angepasste Funktion abzuleiten.

7.1.3 Geländebegehung/Visuelle DGM-Analyse

Bei der Validierung im Gelände wurde deutlich, dass Tagesbrüche nicht, wie zuvor angenommen, nur als steil oder trichterförmig abfallende Senken oder Gräben auftreten, sondern dass sie auch andere Formen haben können. Ortsansässige berichten über zunächst kleine Tagesbrüche, die durch fluviale Erosion nach starken Regenereignissen deutlich vergrößert wurden. Dabei kann bei entsprechender Lage des Tagesbruchs die zum Tal gerichtete Böschungsseite aufbrechen und ein Abfluss entstehen. Dieser Formtyp konnte daher nicht durch die Füllmethode erkannt werden. Bei der visuellen DGM-Analyse (Kap. 4.5) wurde dieser jedoch aufgrund seiner Auffälligkeit als zu klassifizierende, potenziell bergbaubedingte Reliefform interpretiert. Durch die schattenplastischen und dreidimensionalen Darstellungsoptionen des LAS-Datensets konnte die Deutung der Unregelmäßigkeiten dieser und anderer Detektionen vereinfacht werden.

Während der Geländebegehung konnte zufällig eine kleine Tagesöffnung ausgemacht werden, die den Blick in einen alten Stollen zuließ (Abb. 36). Die Öffnung wird jedoch von einem Überbau überragt, sodass diese Bereiche im DGM weder visuell mit der manuellen noch über die semi-automatische Methode erkannt wurde. Gleiches gilt für die stellenweise linienhaft eingebrochenen, oberflächennahen Stollen in diesem Bereich. Für eine eindeutigere Klassifizierung bzw. Validierung wäre der Einsatz von (digitalisierten und georeferenzierten) Grubenbildern sinnvoll.



Abb. 36: Ein entgegen der Hangneigung schräg einfallender Tagesbruch gibt den Blick auf einen Stollen frei. Der obere Bereich verdeckt, von oben betrachtet, den Blick auf die Öffnung des Tagesbruchs und den alten Stollen. Im Innern ist ein Holzstempel zu erkennen.

7.1.4 Kartenmaterial

Die Validierung von Pingen (Kohlengräberlöchern und Kohlengräben) mithilfe des Informationssystems Geologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes 1 : 10 000 lieferte nur zum Teil sehr eindeutige Ergebnisse. An manchen Stellen ist die mögliche Lageabweichung der Kohlenflöze von den detektierten Hohl- und Vollformen recht groß. Aufgrund der relativ hohen Ungenauigkeit dieser geologischen Datengrundlage (vgl. Kap. 6) wird dieser Aspekt jedoch etwas relativiert. Für zukünftige Arbeiten wäre zu empfehlen, flächendeckende geologische Karten mit den tatsächlichen Ausbissen der Kohlenflöze zu konstruieren. Ohne möglichst lagegenau dargestellte Ausstriche sind die Ergebnisse der Validierung anhand geologischer Karten eher kritisch zu bewerten.

7.1.5 Bergbauwanderführer

Die Validierung mithilfe der Bergbauwanderführer ist sicherlich auch mit einer gewissen Skepsis zu betrachten. Auf einige Pingen, Stollenmundlöcher etc. wird eindeutig hingewiesen. Auf andere wird nur mit einem groben räumlichen Verweis Bezug genommen. Es wird deutlich, dass die Verwendung von ergänzenden Methoden und Technologien aus anderen Fachgebieten für Untersuchungen mit bergbauhistorischem Untersuchungsschwerpunkt unerlässlich ist.

7.2 Verbesserungsmöglichkeiten

Eine noch sorgfältigere Ausführung der vorbereitenden Arbeitsschritte (Kap. 4.2) führt gegebenenfalls zu einer weiteren Reduzierung der Fehldetektionen. Auch wenn sich diese nach der digitalen Reliefanalyse vollständig als richtig interpretiert herausgestellt haben, so kommt hier dennoch ein vor allem zeitlicher Aspekt zum Tragen. An etlichen Stellen entlang von wasserführenden Gräben, Straßen, Bachüberquerungen und dergleichen hätte dann keine manuelle Klassifikation falscher abflussloser Senken durchgeführt werden müssen. Durch die Anwendung der Filtermechanismen (vgl. Kap. 4.2.2 u. 4.3.2) konnten in der vorliegenden Arbeit fast 97 % der falschen Hohlformen aus der Datenbank entfernt werden. Bei der Untersuchung einer Karstregion in Texas dezimierten SHAW FAULKNER & STAFFORD & BRYANT (2013: 465 f.) ihre detektierten Senken durch Filterung um ca. 83 %. Der Unterschied von etwa 10 % ist wahrscheinlich auf die unterschiedlichen topographischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten zurückzuführen. Das in Texas untersuchte Areal ist weitestgehend flach, der Bochumer Süden hingegen durch ein heterogenes, wechselhaft geneigtes und zerschnittenes Relief gekennzeichnet. Die zuvor angesprochenen ausführlicheren Vorbereitungen wären wünschenswert, hätten den zeitlichen Umfang dieser Arbeit allerdings überschritten oder mindestens alternative Datengrundlagen (z. B. vektorisiertes topographisches Kartenmaterial) für die Vorbereitung verlangt. Dennoch geben diese Erkenntnisse einen deutlichen Hinweis darauf, dass die intensive Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgebiet und die Datenaufbereitung im Vorfeld für die Resultate reliefbezogener (digitaler) Analysen wichtig sind.

Diejenigen Hohlformen im Bereich Oberdahlhausen, welche sich im Gelände als Fehlidentifikation herausgestellt haben, lagen auf einer Steilwand und auf einer Ablagefläche für Baumschnitt.

Eine Einschränkung in der DGM-gestützten Detektion von Tagesbrüchen ergibt sich aus der Tatsache, dass laut Expertenaussage eines lokalen Forstmitarbeiters Tagesbrüche innerhalb weniger Monate nach Bekanntgeben an die Rechtsnachfolger der Gruben-/Zechenbetriebe verfüllt werden und damit nicht in den LiDAR-Daten enthalten sein können (vgl. auch HARNISCHMACHER & WIENKE 2015: 31 f.).

Die Verwendung von Daten aus Laserscanbefliegungen ist immer auch mit einer, je nach Größe des Untersuchungsgebietes, großen Datenmenge verbunden. Daraus ergaben sich gewisse Herausforderungen bei der Verwaltung der Daten, aber auch im Umgang mit ihnen selbst. Berechnungsverfahren und Analysen nehmen dann mitunter viel Zeit in Anspruch. SHAW FAULKNER & STAFFORD & BRYANT (2013: 462) weisen ebenfalls auf die Schwierigkeiten im Umgang mit LiDAR-Daten in einem GIS hin. Entscheidend dafür, wie präzise kleinförmige Reliefformen identifiziert werden können, ist auch die Genauigkeit bzw. die Punktdichte der LiDAR-Daten. In der vorliegenden Arbeit zeigten sich an manchen Stellen – insbesondere in stark geneigtem Gelände und bei relativ tiefen und steil abfallenden Hohlformen – Ungenauigkeiten in der Darstellbarkeit im LAS-Dataset bzw. im interpolierten DGM.

7.3 Fazit

Die vielfältigen Darstellungs- und Auswertemöglichkeiten der dreidimensionalen Punktdaten in einem LAS-Dataset mit der ArcGIS-Software eigneten sich gut für die Interpretation des DGMs hinsichtlich altbergbaulicher Hinterlassenschaften.

Die Arbeiten von FROESE & MEI (2008) und MÜNCH & NESTLER (2003) führten bei vergleichbarem Forschungsgegenstand zu guten Ergebnissen. Ihre Untersuchungen zu altbergbaulichen Spuren basieren ebenfalls auf der Analyse aus LiDAR-generierten DGMs. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den in dieser Arbeit erzielten Resultaten und unterstützen die Aussagen, dass sich LiDAR-Daten für die Reliefanalyse im Zentimeter- und Dezimeterbereich eignen. Da die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden zur Detektion bergbaubedingter Hohl- und Vollformen alle auf der Grundlage von LiDAR-Punktdaten und dem daraus abgeleiteten Geländemodell basieren, kann der LiDAR-gestützten Untersuchung insgesamt eine gute Eignung zugesprochen werden. Besonders im Vergleich mit traditionelleren Verfahren (z. B. Luftbilddauswertung) verfügt eine Reliefanalyse aus LiDAR-Messungen, insbesondere in waldbestandenen Arealen, über ein deutlich gesteigertes Potenzial. Sowohl die computergestützten hydrologischen Berechnungsverfahren (Füllmethode, Akkumulationsberechnung) als auch die rein visuelle DGM-Analyse und Klassifikation bergbaubedingter Kleinformen führten zu guten Ergebnissen mit geringer Fehlerquote. Flächen ohne Abflussakkumulation konnten im GIS entscheidende Hinweise für die Klassifikation geben.

Für die weitere Erforschung des Themengebietes empfiehlt sich die Entwicklung eines objektiven Regelwerks zur automatischen Identifizierung und Klassifizierung von anthropogen entstandenen lokalen Hohl- und Vollformen. Die GIS-gestützte Umsetzung einer Auswertennorm könnte mit der Entwicklung eines automatischen bzw. semi-automatischen Scripts zur Detektion bergbaubedingter Kleinformen erreicht werden.

Besonders in Bezug auf die zweifelsfreie Unterscheidung zwischen Schurföchern und Bomben-trichtern empfehlen sich weitere alternative Abgleichmethoden. Die Krieglufbildauswertung kann hier als eine ergänzende Möglichkeit dienen, wenn auch dieser Validierungsmethode in Gebieten mit intensiver Vegetationsbedeckung zum Zeitpunkt des Abwurfs Grenzen gesetzt wären.

Das Fachinformationssystem Gefährdungspotenziale des Untergrunds in NRW (https://www.gd.nrw.de/gg_oa.htm) bietet mögliche Anhaltspunkte für die Ausweisung zu untersuchender Gebiete mit vergleichbarem Forschungsgegenstand. Die verfügbare Behördenversion könnte zudem zu Validierungszwecken herangezogen werden. Eine mögliche Ergänzung des Informationssystems wäre wiederum mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu diskutieren.

Denkbar ist außerdem, dass sich das Verfahren in anderen Bergbauregionen anwenden lässt. Die in Kapitel 3.2 erwähnten Publikationen zeigen, dass es weltweit sehr ähnliche Hinterlassenschaften des frühen Bergbaus gibt.

Die Verwendung von Daten aus Laserscanbefliegungen in Verbindung mit der Erstellung und Auswertung digitaler Geländemodelle hat gezeigt, dass die Methode durchaus über Potenzial verfügt. In Bezug auf den Untersuchungsschwerpunkt bietet sie einen Ansatz zur Verbesserung des Kenntnisstandes auf diesem Fachgebiet. Für eine abschließende und eindeutige Bewertung der Fragestellung ist sie zum aktuellen Zeitpunkt allein allerdings nicht ausreichend und nur in Verbindung mit anderen Beiträgen und Technologien (Feldforschung, Karten, Bohrungen u. a.) aus den unterschiedlichen Fachgebieten zu verwenden.

Die LiDAR-gestützte Reliefanalyse allein kann nicht den Anspruch einer vollständigen und ausnahmslos korrekten Erfassung aller bergbaubedingter Kleinformen erheben. Insgesamt konnten durch die Ergebnisse dieser Arbeit bereits vorhandene Methoden zur Detektion von Senken auf der Grundlage von LiDAR-Daten hin zu einer verfeinerten Klassifikation in bergbauhistorischen Regionen erweitert werden. Es wurden zahlreiche Erkenntnisse über den Formenreichtum von bergbaulichen Kleinstreliken sowie deren fernerkundliche Detektion und Abgrenzung zu anderen lokalen Kleinformen in einer bergbauhistorischen Region gewonnen.

8 Schlusswort

Bei der vorliegenden Arbeit, die bereits im Jahr 2016 verfasst wurde, handelt es sich um eine gekürzte und veränderte Fassung der Bachelor-Thesis „LiDAR-gestützte Detektion bergbaubedingter Kleinformen im Bochumer Süden“. Diese wurde unter der Betreuung von PD Dr. Stefan Harnischmacher am Fachbereich 19 – Geographie – der Philipps-Universität Marburg angefertigt. Ihm danke ich herzlich für die stets vorhandene Hilfsbereitschaft und die anregenden Diskussionen sowohl bei der Planung als auch bei der Durchführung meiner Arbeit.

Mein Dank gilt dem Geologischen Dienst NRW, im Besonderen Stefan Henscheid mit seiner konstruktiven Kritik. Dr. Till Kasielke vom Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum möchte ich danken für die gemeinsame Geländebegehung in Bochum. Ihm sowie Prof. Dr. Harald Zepp vom Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum bin ich für die interessanten und aufschlussreichen Gespräche sowie daraus neu entwickelte Ideen zu Dank verpflichtet.

9 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F. (1999): Airborne laser scanning – present status and future expectations. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **54**: 64 – 67.
- BADER, K. H.; RÖTTGER, K. (1987): 250 Jahre märkischer Steinkohlenbergbau: Ein Beitrag zur Geschichte des Bergbaus, der Bergverwaltung und der Stadt Bochum. – Bochum (Studienverlag Dr. N. Brockmeyer).
- BATER, W. C.; COOPS, N. C. (2009): Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. – *Computer & Geosciences*, **35**: 289 – 300.
- BEIER, E. (2003): Bergbaurundweg „Ruhr-Uni“. – Bochum (Ponte Press Verlags GmbH).
- BELL, F. G.; DONNELLY, L. J. (2006): Mining and its Impact on the Environment. – New York (Taylor & Francis).
- Bez.-Reg. Arnsberg (2006): Bericht zum Thema „Hinterlassenschaften des Bergbaus – der Altbergbau im Ruhrrevier vor dem Hintergrund des geplanten Börsengangs der RAG“. – [https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/r/regionalrat_arnsberg/tagesordnungen/2006/06_09_28/top_05.pdf, letzter Zugriff: 20.04.2015]
- Bez.-Reg. Arnsberg (2018): Altbergbau – Gefahrenabwehr. – [https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/a/altbergbau_gefahrenabwehr/index.php, letzter Zugriff: 08.02.2018]
- DEGE, WILHELM; DEGE, WILFRIED (1983): Das Ruhrgebiet. – 3., ber. Aufl.; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- DIKAU, R. (1989): The application of digital relief model to landform analysis in geomorphology. – In: RAPER, J. F. [Hrsg.]: Three dimensional applications in geographic information systems: 51 – 77; London (Taylor & Francis).
- DOCTOR, D. H.; YOUNG, A. J. (2013): An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital data. – In: DOCTOR, D. H.; LAND, L.; STEPHENSON, J. B. [Hrsg.]: Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference: 449 – 458; Carlsbad (National Cave and Karst Research Institute).
- DROZDZEWSKI, G.; KOETTER, G. (2008): Geologie und Bergbau im südlichen Ruhrgebiet: Das Muttental bei Witten. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, **90**: 287 – 316; Lahrt/Schwarzwald, Ottersweier/Baden.
- ECKHAUT, M. VAN DEN; POESEN, J.; DUSAR, M.; MARTENS, V.; DUCHATEAU, PH. (2007): Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium). – *Geomorphology*, **91**: 19 – 37.
- FESSNER, M. (1998): Steinkohle und Salz – Der lange Weg zum industriellen Ruhrrevier. – Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum, **73**: 458 S.; Essen (Deutsches Bergbau-Museum Bochum).
- FILIN, S.; BARUCH, A. (2010): Detection of Sinkhole Hazards using Airborne Laser Scanning Data. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **76** (5): 577 – 587.

- FROESE, C. R.; MEI, S. (2008): Mapping and monitoring coal mine subsidence using LiDAR and InSAR. – In: CGS (Canadian Geotechnical Society), IAH (International Association of Hydrogeologists) & CNC (Canadian National Chapter) [Hrsg.]: GeoEdmonton'08: 61st Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference: 1127 – 1133; Edmonton (GeoEdmonton'08 Organizing Committee).
- GANTENBERG, W. E. (2009): Auf alten Kohlenwegen (**Bd. 1**). – Essen (Klartext Verl.).
- GANTENBERG, W. E.; WÜHRL, E. (2006): Vom Kohlengraben zum Tiefbau. Wanderungen durch die Bergbaugeschichte und die Geologie in Linden-Dahlhausen im Stadtbezirk Bochum-Südwest. – Essen (Klartext Verl.).
- GORELIK, A.; STEFFENS, G. (2012): Der mittelalterlich bis frühzeitliche Bergbau am Eisenberg von Olsberg. – In: BGVR e. V. (Bergbau- und Grubenarchäologischer Verein Ruhr e. V.) [Hrsg.]: (Alt) Bergbau- und -Forschung in NRW: 42 – 50; Remscheid (Eigenverlag BGVR e. V.).
- HARNISCHMACHER, S. (2015): Relief aus Menschenhand. – Praxis Geographie, **45** (1): 4 – 9; Braunschweig.
- HARNISCHMACHER, S.; WIENKE, S. (2015): Reliefveränderungen als Folge des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet. – Praxis Geographie, **45** (1): 30 – 35; Braunschweig.
- HARNISCHMACHER, S.; ZEPP, H. (2014): Mining and its impact on the earth surface in the Ruhr District (Germany). – Zeitschrift für Geomorphologie, **58**: 3 – 22; Stuttgart.
- HOEPFNER, U. (2012): Haldenlandschaften des Bergbaus. – Geographische Rundschau, **64/1**: 20 – 52; Braunschweig.
- HUTCHINSON, J.; PHILLIPS, C.; CASCANTE, G. (2002): Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning. – Geotechnical and Geological Engineering, **20**: 41 – 63.
- HUSKE, J. (2006): Die Steinkohlenzechen im Ruhrrevier. Daten und Fakten von den Anfängen bis 2005. – 3. Auflage; Bochum (Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum).
- JENNINGS, J. N. (1985): Karst Geomorphology. – Glasgow (Bell and Bain Ltd).
- KASIELKE, T. (2015): Geologie und Reliefentwicklung im Raum Bochum. – Jahrb. Bochumer Bot. Ver., **7** (3): 15 – 36; Bochum.
- KEIL, A.; WETTERAU, B. (2013): Metropole Ruhr. Landeskundliche Betrachtung des neuen Ruhrgebiets. – Essen (Woeste Druck + Verlag).
- KNAUF, N. (2012): Einblicke in die Montangeschichte der Grube „Grube Wohlfahrt“ in Hellenthal-Rescheid. – In: BGVR e. V. (Bergbau- und Grubenarchäologischer Verein Ruhr e. V.) [Hrsg.]: (Alt) Bergbau- und -Forschung in NRW: 52 – 66; Remscheid (Eigenverlag BGVR e. V.).
- KRATZSCH, H. (1974): Bergschadenkunde. – Berlin/Heidelberg (Springer-Verlag).
- KÜHN, F.; TREMBICH, G.; HÖRIG, B. (1998): Remote sensing for evaluating hazards caused by underground mining. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, **44** (3): 172 – 180; Stuttgart.
- LESER, H. (2009): Geomorphologie (= Das Geographische Seminar). – 9. Aufl.; Braunschweig (Westermann).
- MEIER, G.; MEIER, J. (2007): Erdfälle und Tagesbrüche – Möglichkeiten einer numerischen Modellierung. – Bulletin für angewandte Geologie, **12** (1): 91 – 103.
- MÜGGE, V.; CRAMM, T.; RÜHL, W. (2008): Geotope im Raum Hagen und historischer Bergbau in Dortmund-Hohensyburg. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, **90**: 361 – 399; Lahr/Schwarzwald, Ottersweier/Baden.
- MÜNCH, U.; NESTLER, P. (2003): Airborne Laserscanning als Ergänzung der Erkundungsmethodik von Braunkohlen-Altbergbau. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, **10** (1/2): 7 – 18; Kleinmachnow.
- MWIDE NRW (2017): Antwort der Landesregierung auf die große Anfrage 1 der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Gefährdung durch Altbergbau. – Düsseldorf.

- PASTOL, Y. (2011): Use of Airborne LiDAR Bathymetry for Coastal Hydrographic Surveying: The French Experience. – *Journal of Coastal Research (Special Issue)*, **62**: 6 – 18.
- PÉNTEK, K.; VERESS, M.; LÓCZY, D. (2007): A morphometric classification of solution dolines. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, **51** (1): 19 – 30; Berlin, Stuttgart.
- PFLÄGING, K. (1999): Steins Reise durch den Kohlenbergbau an der Ruhr. Der junge Freiherr vom Stein als Bergdirektor in der Grafschaft Mark. – Horb/Neckar (Geiger-Verlag).
- RAGSCH, A.; PONTHÖFER, L. (1986): Wirtschaftsraum Ruhrgebiet, Genese – Strukturen – Planung – Materialien zu einer Raumanalyse. – Frankfurt/Main (Hirschgraben Verlag).
- RAHIMI, M.; ALEXANDER, E. C. (2013): Locating sinkholes in LiDAR coverage of a glacio-fluvial karst, Winona County, MN. – In: DOCTOR, D. H.; LAND, L.; STEPHENSON, J. B. [Hrsg.]: Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference: 469 – 480; Carlsbad (National Cave and Karst Research Institute).
- SCHÄUBLE, H. (2003): HydroTools 1.0 for ArcView 3.x. – Institut für angewandte Geowissenschaften. – Darmstadt.
- SCHILP, T.; REININGHAUS, W.; HUSKE, J. (1993): Das Muth-, Verleih- und Bestätigungsbuch, 1770 – 1773: eine Quelle zur Frühgeschichte des Ruhrbergbaus. – Veröffentlichungen des Stadtarchivs Dortmund, **9**; Dortmund (Dortmund Stadtarchiv).
- SHAW FAULKNER, M. G.; STAFFORD, K. W.; BRYANT, A. W. (2013): Delineating and classification of karst depressions using LiDAR: Fort Hood military installation, Texas. – In: DOCTOR, D. H.; LAND, L.; STEPHENSON, J. B. [Hrsg.]: Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference: 459 – 467; Carlsbad (National Cave and Karst Research Institute).
- SINGH, K. B.; DHAR, B. B. (1997): Sinkhole subsidence due to mining. – *Geotechnical and Geological Engineering*, **15**: 327 – 341.
- Stadt Bochum (2015): Historischer Bergbauwanderweg Baak (Erste „Eisen“-Bahn Deutschlands). – [<http://www.bochum.de/C125708500379A31/vwContentByKey/W277NBQB491BOLDDE?open&MCL=77NBLM883BOLD#par3>, letzter Zugriff: 07.12.2015]
- SZELAG, S.; WEBER, U. (1993): Bergsenkung. – In: WIGGERING, H. [Hrsg.]: Steinkohlenbergbau – Steinkohle als Grundstoff, Energieträger und Umweltfaktor: 121 – 136; Berlin (Ernst & Sohn).
- UTTING, D. J.; DEMONT, G. J.; GOODWIN, T. A.; BROUGHM, T.; WEBSTER, T. (2010): Identification of geohazards using LiDAR, Nova Scotia. – *Atlantic Geology*, **46**: 43 – 75.
- WEDDE, R.-G. (2003): Tagesbrüche – Folgeerscheinungen des untertägigen Braunkohlenbergbaus in Ostbrandenburg. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, **10** (1/2): 39 – 45; Kleinmachnow.
- WIGGERING, H.; ZIMMERMEYER, G. (1993): Steinkohlenbergbau – Voraussetzungen, Entwicklung und Folgeproblematiken. – In: WIGGERING, H. [Hrsg.]: Steinkohlenbergbau – Steinkohle als Grundstoff, Energieträger und Umweltfaktor: 15 – 20; Berlin (Ernst & Sohn).
- WÓJCIK, J. (2012): Mining changes on the example of Wałbrzych Basin relief (The Sudetes, Poland). – *Zeitschrift für Geomorphologie*, **57** (2): 187 – 205.
- WUNDERLICH, H.-G. (1968): Einführung in die Geologie. Band 1: Exogene Dynamik. – Bibliographisches Institut AG. – Mannheim.
- ZEPP, H. (2011): Geomorphologie. Eine Einführung – 5. Auflage; Paderborn (Ferdinand Schöningh).

10 Kartographische Grundlegendaten

Geobasis NRW (Bez.-Reg. Köln) (2015):

- LiDAR-Punktdaten (DGM1L)
- Digitale Topographische Karte (DTK 25), Bereich Bochum, Maßstab 1 : 25 000
- digitalisierte Kartenblätter (4508 Essen, 4509 Bochum) der Topographischen Kartenblätter (TK 25), Maßstab 1 : 25 000. – Köln

Geofabrik GmbH (2015): OSM (OpenStreetMap)-Shape-Datensatz für Deutschland. –

[download.geofabrik.de/europe/germany-latest.osm.pbf, letzter Zugriff: 08.03.2016]

Geologischer Dienst NRW (2009): Informationssystem Geologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes, Maßstab 1 : 10 000. – Krefeld.

Stadt Bochum, Vermessungs- u. Katasteramt [Hrsg.] (2008): Deutsche Grundkarte (DGK 5), Maßstab 1 : 5 000. – Bochum.

Impressum

Alle Rechte vorbehalten

scriptum *online*

Geowissenschaftliche Arbeitsergebnisse aus Nordrhein-Westfalen

© 2019 Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb –

De-Greiff-Straße 195 · 47803 Krefeld · Postfach 10 07 63 · 47707 Krefeld

Fon 0 21 51 897-0 · poststelle@gd.nrw.de

www.gd.nrw.de

Satz und Gestaltung:

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen

Für den Inhalt des Beitrags ist der Autor allein verantwortlich.

scriptum *online* erscheint in unregelmäßigen Abständen.

Kostenloser Download über www.gd.nrw.de

ISSN 2510-1331