

Analyse und Modellierung großräumiger bergbaubedingter Senkungen aus photogrammetrischen Beobachtungen

Dr.-Ing. Andreas Streerath und Dipl.-Ing. Rainer Roosmann

Einleitung

Die untertägige Gewinnung einer Lagerstätte ist mit Bewegungen der Tagesoberfläche verbunden. In der Bundesrepublik Deutschland kann der Bergbaubetreiber u.a. durch das Bundesberggesetz [BBergG] dazu verpflichtet werden die eingetretenen Bewegungen zu erfassen. Seit den achtziger Jahren erfolgt im Ruhrbergbau die Erfassung großräumiger Bodenbewegungen auf Basis aerophotogrammetrischer Messungen [1]. Die Oberfläche eines großflächigen Untersuchungsraumes wird dabei durch ein Punktfeld abgebildet. Die Ableitung von Höhenänderungen erfolgt über eine Differenzbildung multitemporal vorliegender Höhen identischer Punkte.

Grundsätzlich werden Höhenänderungen zwischen zwei Messkampagnen in Bergsenkungsgebieten überwiegend durch bergbauliche Aktivitäten hervorgerufen. Einfluß auf die vertikale Bodenbewegung im Untersuchungsgebiet können allerdings auch andere anthropogene oder natürliche Einflüsse haben, wie z.B. Baumaßnahmen, landwirtschaftliche Tätigkeiten, Erosionen. Diese nicht-bergbaubedingten Höhenänderungen müssen ermittelt und eliminiert bzw. minimiert werden.

Neben diesen Einflüssen sind die photogrammetrisch erfaßten Höhenänderungen von mess- und auswertetechnischen Anteilen überlagert, die in Form von groben Fehlern sowie systematischen und zufälligen Abweichungen auftreten.

Aus diesem Grund können und dürfen die originären Differenzen der Punkthöhen identischer Punkte zweier Messepochen zunächst nur als Höhenänderungen (vgl. Abbildung 1) und nicht als bergbauinduzierte Senkungen bezeichnet werden.

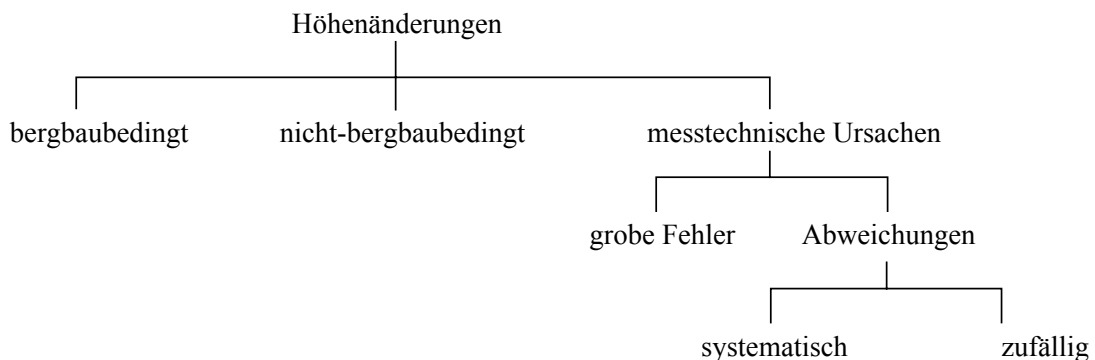


Abbildung 1: Höhenänderungen und deren Ursache

In einem ersten Bearbeitungsschritt zur Ermittlung bergbaubedinter Höhenänderungen sind zunächst die groben Fehler sowie die nicht-bergbaubedingten Anteile zu detektieren und zu eliminieren. Um auch eine vom Messrauschen befreite plausible homogene Senkungsoberfläche zu erhalten, ist ein Oberflächenmodellierungsverfahren einzuführen, welches die unterschiedlichen Genauigkeiten der punktuellen Senkungen berücksichtigt.

Obwohl die Ursachen verschiedener Höhenänderungsanteile und daraus ableitbare Entscheidungskriterien weitestgehend bekannt sind, wurden diese bei der bisherigen Analyse der Massendaten wegen des Fehlens einer standardisierten Bearbeitungsmethodik und unzureichender EDV-technischer Unterstützung nur zum Teil berücksichtigt. Die Ergebnisse waren hierdurch subjektiv beeinflusst und somit nicht eindeutig reproduzierbar, fehleranfällig, kaum dokumentierbar, zeit- und kostenintensiv sowie qualitativ verbesserbar.

Das Ziel einer methodisch neu konzipierten und einer erweiterten EDV-technischen Unterstützung der Senkungsanalyse ist daher:

- die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und durch die Definition und Umsetzung klarer Entscheidungskriterien,
- eine deutliche Verringerung des Bearbeitungsaufwandes durch die Entwicklung und Umsetzung eines standardisierten und automatisierbaren Verfahrensablaufes und
- eine qualitative Verbesserung der Ergebnisse durch die Verwendung mathematischer, statistischer und informationstechnischer Verfahren.

Die konkrete Umsetzung dieser Ziele führte zur Entwicklung des Bodenbewegungsanalyse-Systems BOBESYS auf Basis des Geoinformationssystems (GIS) ArcView.

Zur Ableitung plausibler bergbaubedingter Senkungen bedarf es drei wesentlicher Voraussetzungen.

- Einheitliche Standards für die photogrammetrische Koordinatenerfassung,
- Konzept und Methoden für die Senkungsanalyse und
- Geeignetes Modellierungsverfahren für die Berechnung eines digitalen Senkungsoberflächenmodells.

Auf eine detaillierte Darstellung spezifischer Vorgaben an die photogrammetrische Punktbestimmung bei der Erfassung großräumiger bergbaubedingter Senkungen wie z.B. die Bildflugplanung, Passpunktbestimmung, Befliegung und Auswertung soll hier verzichtet und auf STREERATH verwiesen werden.

Konzept zur Ableitung plausibler bergbaubedingter Senkungen

Grundsätzlich ist das tatsächliche Bewegungsverhalten zu überwachender Objekte a priori nicht bekannt. Rückschlüsse oder das Ableiten von Tendenzen sind jedoch dann möglich, wenn die Kräfte, die auf das Objekt wirken, und dessen Verformungseigenschaften bekannt sind. Bei bergbauinduzierten Senkungen ist das Bewegungsverhalten aufgrund der Gesetzmäßigkeiten zwischen Abbauhohlraum und Tagesoberfläche näherungsweise bekannt. Die hier vorgestellte Analyse nutzt dieses Wissen und zwar den Umstand, dass bergbaubedingte Senkungen in der Regel homogen und stetig auftreten.

Zentrale Bedeutung bei der Analyse nimmt ein Modellierungsalgorithmus ein. Dieser Algorithmus, der auf einem robusten Flächenausgleichungsansatz und einer dynamischen Teilflächenbildung beruht, modelliert auf Basis der originären punktuellen photogrammetrisch ermittelten Höhenänderungen näherungsweise eingetretene homogenen Senkungen auch dann noch, wenn sie grobe Fehler oder nicht-bergbaubedingte Höhenänderungen aufweisen. Die Gegenüberstellung dieser modellierten Senkungen und photogrammetrisch abgeleiteter Höhenänderungen ermöglicht es, grobe Fehler eindeutig zu detektieren. Hierzu werden statistische Tests genutzt. Diese Tests ermöglichen auch die Lokalisierung nicht-bergbaubedingter Anteile, da auch sie eine Abweichung vom homogenen Senkungerscheinungsbild verursachen. Aus später näher dargestellten Gründen handelt es sich bei den lokalisierten nicht-bergbaubedingten Anteilen jedoch zunächst nur um Verdachtsmomente, so dass sie mit Hilfe von Zusatzinformationen weiter zu prüfen sind.

Eingetretene homogene Senkungen werden in sogenannten „Lokalen Näherungsmodellen Homogener Bergbauinduzierter Senkungen (LNHBS)“ näherungsweise modelliert. Dabei handelt es sich um lokal begrenzte robust ausgeglichene Flächenpolynome zweiter Ordnung. Die Bereitstellung mehrerer lokal

begrenzter Näherungsmodelle ist notwendig, da ein großer Untersuchungsraum nicht in einem einzigen Näherungsmodell generiert werden kann.

Warum findet eine robuste Flächenausgleichung Anwendung?

Weisen die photogrammetrisch bestimmten Höhenänderungen keine verfälschten Höhenänderungen - also kein groben Fehler oder nicht-bergbaubedingte Anteile - auf, dann handelt es sich bei den Höhenänderungen annähernd um Senkungen. Sie weisen lediglich zufällige Abweichungen auf. Diese Senkungen können mit einem Flächenpolynom und einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (L_2 -Norm-Methode) modelliert werden.

Verfälschte Höhenänderungen stellen dagegen ausschlagende Beobachtungen dar, die die Parameterschätzung bei Nutzung einer L_2 -Norm-Methode verzerren. Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Modellbildung und auf die Ergebnisse der statistischen Tests.

Ein robustes Ausgleichungsverfahren, wie die hier genutzte L_1 -Norm-Methode ermöglicht dagegen in begrenztem Maße die Ermittlung plausibelster Werte, auch dann noch, wenn Ausreißer vorliegen. Liegen verfälschte Höhenänderungen innerhalb einer Teilfläche kleinräumig oder vereinzelt vor, kann auf Basis einer robusten L_1 -Norm-Ausgleichung grundsätzlich ein LNHBS modelliert werden. Die Wirkung verfälschter Höhenänderungen auf die Modellbildung wird in Abbildung 2 dargestellt. Trotz Vorhandenseins von verfälschten Höhenänderungen werden bei Verwendung einer robusten Flächenausgleichung die homogenen Senkungen näherungsweise modelliert.

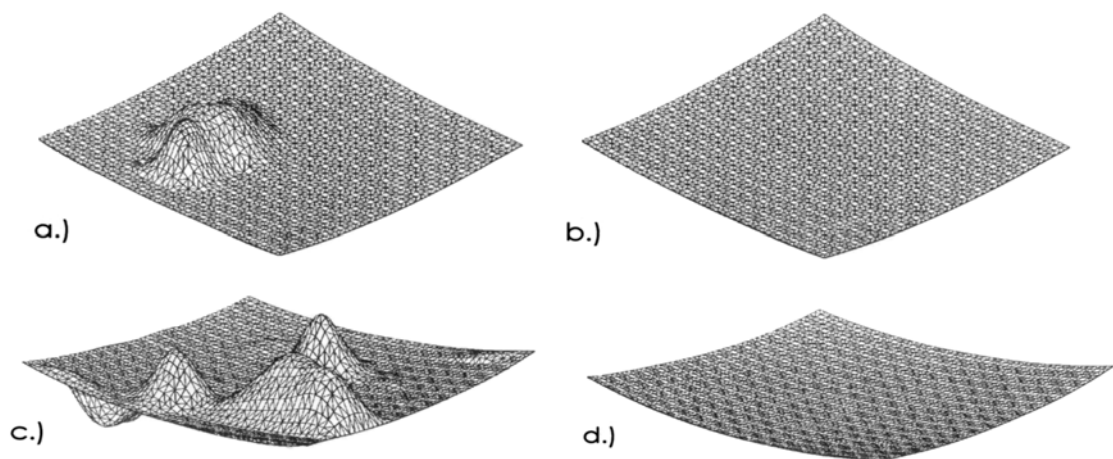


Abbildung 2: Auswirkungen vereinzelter oder räumlich verteilter verfälschter Höhenänderungen auf die Modellbildung.

- a.) Oberfläche mit verfälschten Höhenänderungen (kleine Punktgruppe)
- b.) L_1 -ausgeglichene Oberfläche, gleiche Datenbasis wie a
- c.) Oberfläche mit verfälschten Höhenänderungen (räumlich verteilt)
- d.) L_1 -ausgeglichene Oberfläche, gleiche Datenbasis wie c

Ist der Anteil verfälschter Höhenänderungen jedoch zu groß, kann auch mit einer L_1 -Norm kein LNHBS sondern nur eine beliebige lokale Fläche zweiter Ordnung generiert werden. Ein solches Modell soll als „Lokales Beliebiges Flächen-Modell (LBFM)“ bezeichnet werden. Werden LBFM als Vergleichsmodelle genutzt, werden nicht die Abweichungen der photogrammetrisch bestimmten Höhenänderungen zu den modellierten homogenen bergbaubedingten Senkungen, sondern zu einer beliebigen Fläche zweiter Ordnung statistisch geprüft. Diese Test haben keine Aussagekraft im Sinne der Detektion verfälschter Höhenänderungen.

Dynamische Teilflächenbildung

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass LBFM modelliert werden, wenn die Anzahl verfälschter Höhenänderungen innerhalb einer Teilfläche zu groß sind. Wird der Untersuchungsraum in starre, gleichgroße Teilflächen (Raster / Statische Teilflächen) unterteilt, besteht die begründete Gefahr, dass wie beispielsweise in den schraffierten Flächen der Abbildung 3/rechts dargestellt, der Anteil verfälschter Höhenänderungen derart groß ist, dass nicht das gesuchte Nahrungsmodell generiert werden kann.

Findet eine Teilflächenbildung hingegen in der Form statt, dass verfälschte Höhenänderungen nur in kleinen Punktgruppen oder als Einzelpunkte vorliegen, werden grundsätzlich LNHBS generiert. Eine solche Einteilung ist – wenn großflächig Bereiche mit verfälschten Höhenänderungen vorliegen – für den gesamten Senkungstrog bei einer Statischen Teilflächenbildung (vgl. Abbildung 3 / rechts) nicht möglich. Wenn die Teilflächenbildung jedoch so erfolgt, dass um jeden Beobachtungspunkt eine $n \times n$ m² große Teilfläche gebildet wird (Dynamische Teilflächenbildung Abbildung 3 / links), ist gewährleistet, dass jeder großräumige Bereich mit verfälschten Höhenänderungen - zumindest in einer der Teilflächen – nur an seinen Randbereichen erfasst wird.

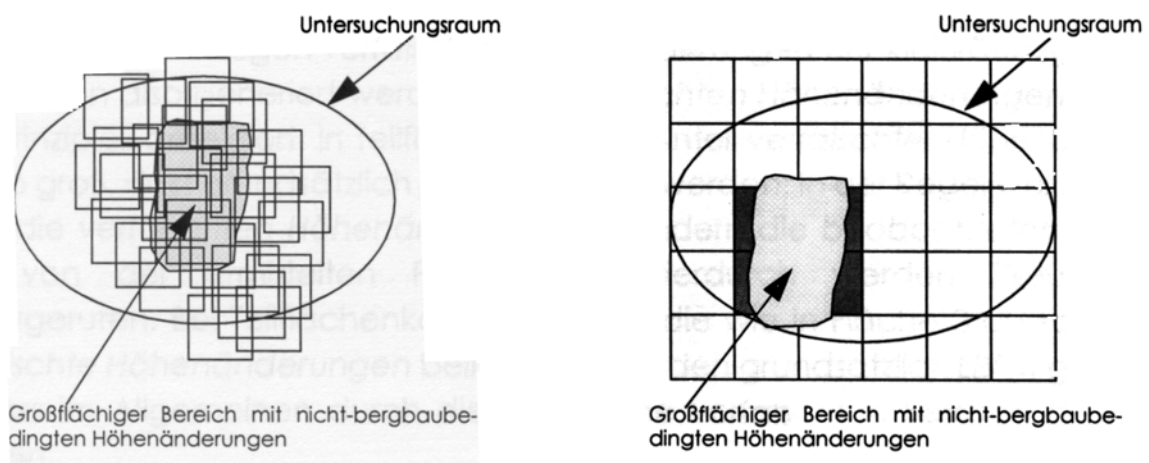


Abbildung 3: Links: Dynamische Teilflächenbildung
Rechts: Statische Teilflächenbildung

Auch eine solche Dynamische Teilflächenbildung ermöglichen nicht, dass grundsätzlich LNHBS generiert werden. Die Dynamische Teilflächenbildung ermöglicht jedoch, dass jeder großräumige Bereich mit verfälschten Höhenänderungen - zumindest in einigen der Teilflächen - nur an seinen Randbereichen erfasst wird. Hierdurch werden zwar nicht alle verfälschten Höhenänderungen ermittelt; großräumige Bereiche jedoch räumlich eingegrenzt. Die Größe der Teilfläche ist abhängig von der Erscheinungsform der Senkungsmulde und ist auf Basis der vorausberechneten Senkungen zunächst zu bestimmen [vgl. STREERATH].

Detektion verfälschter Höhenänderungen

Die Detektion verfälschter Höhenänderungen erfolgt über statistische Tests. Als statistische Testgrößen werden die normierten (standardisierten) Verbesserungen genutzt:

$$T_i = \frac{\delta_i}{\sigma_{\delta_i}}$$

Große Fehler werden eindeutig über ihre statistische Testgröße erkannt. Höhenänderungen mit nicht-bergbaubedingten Anteilen können - wie in STREERATH empirisch ermittelt - Testgrößen bis zu einem Wert von 1,2 aufweisen. Erhöhte Testwerte sind jedoch nicht grundsätzlich auf nicht-bergbaubedingte Anteile zurückzuführen sondern können auch beispielsweise durch Unstetigkeitszonen, Modellrestfehler oder LBFM hervorgerufen werden. Mit Hilfe von Zusatzinformationen ist daher die tatsächliche Ursache zu ermitteln.

Zusatzinformationen stellen alle Informationen dar, die entweder die Ursachen nicht-bergbaubedingter Höhenänderungsanteile erklären oder aufzeigen, dass Abweichungen vom homogenen Senkungserscheinungsbild in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Bergbau stehen.

Als Zusatzinformationen eignen sich insbesondere die Luftbilder selber, da eine Veränderung der Oberflächensituation direkt durch einen Vergleich in den Luftbildern erkannt werden kann. Weitere wichtige Zusatzinformationen stellen u.a. Abbaudaten Grundwasserstands- sowie geologische und hydrogeologische Angaben dar. Mess- und Auswertetechnische Ursachen können über einen Nachbarschaftsvergleich der Höhenänderungen aufgezeigt werden. Beispielhaft sind in den Anlagen 1 und 2 detektierte verfälschte Höhenänderungen gemeinsam mit georeferenzierten Luftbildern beider Aufnahmezeitpunkte dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt auf, dass zwischen den beiden Befliegungen die Straße inklusive der Randbereiche baulich verändert wurde. Eine eindeutige Ursachenzuordnung der erhöhten Testwerte liegt somit vor.

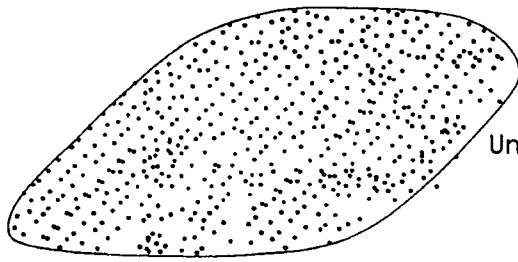
Durch die kombinierte Nutzung, - die Gegenüberstellung von raumbezogenen Zusatzinformationen und mathematisch/statistisch detektierten Verdachtsmomenten in einem GIS wird eine fachlich plausible ursachenbegründete Detektion nicht bergbaubedingter Höhenänderungen ermöglicht. Die derart detektierten Höhenänderungen dürfen nicht für einen Epochenvergleich genutzt werden.

Plausible bergbaubedingte Senkungsoberfläche

Sieht man von systematischen Abweichungen ab, werden die von groben Fehlern und nicht-bergbaubedingten Höhenänderungsanteilen befreiten Punktinformationen nur durch zufällige Abweichungen überlagert. Um eine vom Messrauschen befreite plausible homogene Senkungsoberfläche zu modellieren, ist ein Interpolationsverfahren mit Filterung [vgl. RUTISHAUSER 1974] zu nutzen, welches die unterschiedlichen Genauigkeiten der punktuellen Senkungen berücksichtigt.

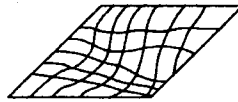
Für die Erzeugung der plausiblen bergbaubedingten Senkungsoberfläche wird ein Gewichteter Mehrstufiger B-Splinealgorithmus (GMB) genutzt. Er erzeugt eine NURBS-Fläche, die ungeordnet vorliegende und unregelmäßig verteilte Massenpunkte in Abhängigkeit von einem gewählten Abbruchkriterium, der Iterationszahl, entweder interpoliert oder approximiert. Durch die Einführung von Gewichten, die sich aus einer Genauigkeitsabschätzung [vgl. STREERATH] ergeben, werden die unterschiedlichen Genauigkeiten der punktuellen Senkungen berücksichtigt. Die Iterationszahl wird auf Basis nachberechneter Senkungen bestimmt.

Das Konzept zur Ableitung plausibler bergbaubedingter Senkungen ist zusammenfassend in Abbildung 4 dargestellt.

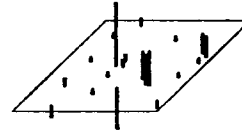


Untersuchungsraum mit identischen Punkten

- 1a. Bildung dynamischer Teilflächen
- 1b. Berechnung von LNHBS

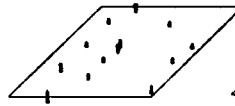


- 2. Statistische Tests (Signifikanzprüfung)

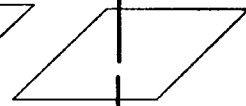


3b. verfälschte Höhenänderungen

- 3. Ergebnis der Signifikanzprüfung

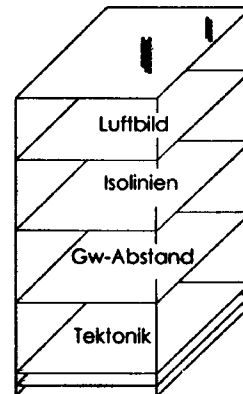


3a. bergbaubedingte Höhenänderungen

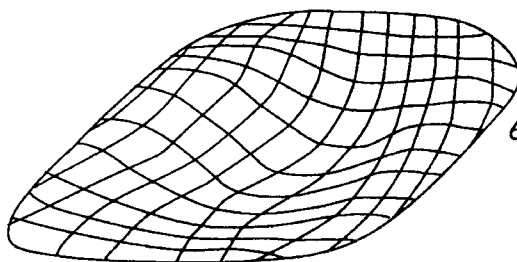
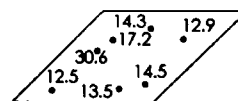


3c. grobe Fehler

- 4. Ursachenbezogene Zuordnung der mathematisch/statistisch gewonnenen Verdachtsmomente durch Verschneidung mit Zusatzinformationen



- 5. Nachbarschaftsvergleich der Höhenänderungswerte



- 6. Berechnung des DSOM mit einem Interpolationsverfahren mit Filterung auf Basis der bereinigten Differenzbeträge

Abbildung4: Konzept zur Ableitung plausibler bergbaubedingter Senkungen

GIS-basiertes dreidimensionales Bodenbewegungsanalyse-System

Die beschriebene Methodik zur Detektion plausibler bergbaubedingter Senkungen ist in dem GIS-basierten dreidimensionalen Bodenbewegungsanalyse-System BOBESYS implementiert. BOBESYS wurde als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG (DSK) entwickelt und soll den Sachbearbeiter bei allen Arbeitsschritten zur Erfassung und Analyse der bergbaubedingten Bodenbewegungen unterstützen und somit den Bearbeitungsvorgang unter Berücksichtigung der qualitativen Vorgaben optimieren.

Der Geschäftsprozeß „Bodenbewegungsanalyse“ der DSK wurde mit der Unified Modelling Language (UML) modelliert und durch eine Erweiterung der Funktionalitäten des Desktop-GIS ArcView der Firma ESRI realisiert. Die Realisierung erfolgte mit den Programmiersprachen Avenue und Visual C++. Hierbei wurde darauf geachtet, dass rechenintensive Prozesse über Visual C++ abgewickelt werden, da teilweise sehr große Datenmengen verarbeitet werden müssen.

Das Informationssystem bindet vorhandene Datei- und Datenbanksysteme ein und bietet darüber hinaus eine Schnittstelle zur Photogrammetrie (siehe Grafik).

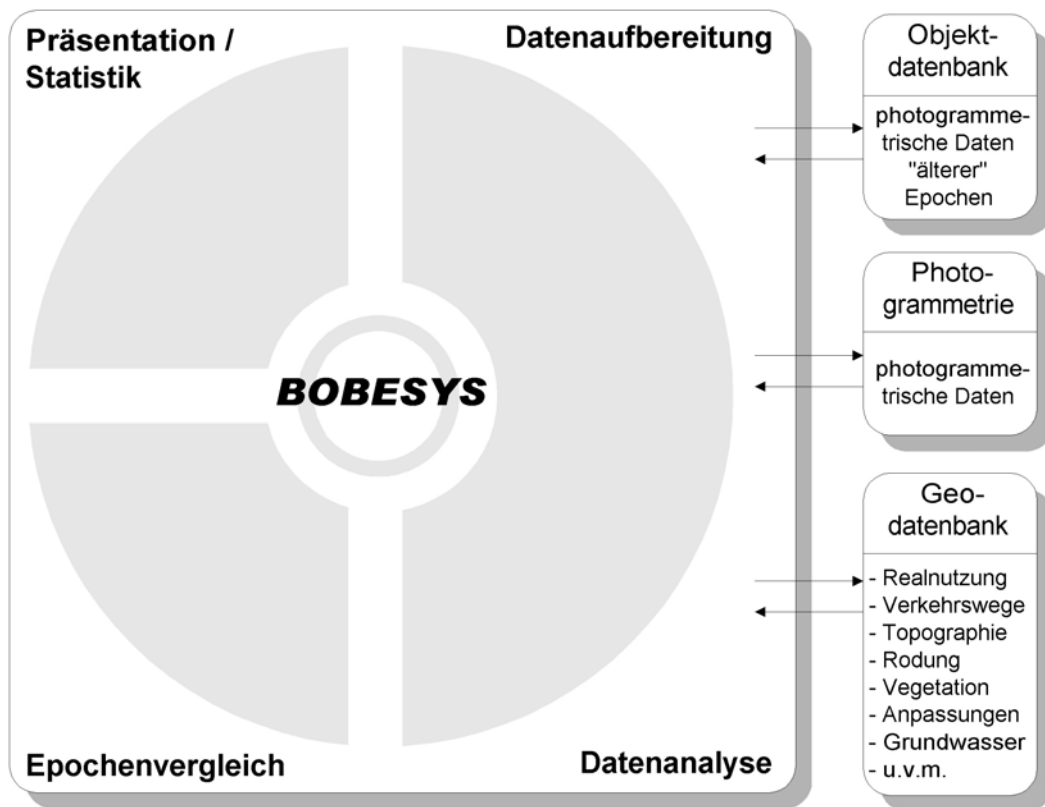


Abbildung 5: Aufbau des Bodenbewegungsanalyse-System BOBESYS

Grundsätzlich bietet BOBESYS die komplette Unterstützung zur Bearbeitung der Bodenbewegungsanalyse (Analyse der horizontalen und vertikalen Bodenbewegungen) und stellt folgende Module bereit:

1. Epochendaten einstellen,
2. Fehlende ODB-Daten anzeigen,
3. Datenkonvertierung,
4. Photodaten bereinigen,
5. Punktidentitätskontrolle,
6. Fehlersuche:
 - 6.1. Fehlersuche Höhe,
 - 6.2. Fehlersuche Lage,
7. Epochenvergleich,
8. Ergebnispräsentation,
9. Konvertierung:
 - 9.1. Konvertierung Anfahrdaten Photogrammetrie
 - 9.2. Konvertierung in das ODB-Format
10. Arbeitsfortschritt anzeigen.

Zur Analyse und Modellierung großräumiger bergbaubedingter Senkungen aus photogrammetrischen Beobachtungen sind die „Bereinigung der Photodaten“, „Punktidentitätskontrolle“, „Fehlersuche Höhe“, „Epochenvergleich“, „Ergebnispräsentation“ und „Arbeitsfortschritt anzeigen“ von Interesse und sollen im folgenden kurz erläutert werden.

Photodaten bereinigen

Folgende photogrammetrisch erfaßten Punkte sind als „unsicher“ anzusehen und sollen für die Weiterverarbeitung nicht genutzt werden:

- Punkte außerhalb des Blockumrings (definiert die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebietes),
- Verknüpfungspunkte (werden zur Berechnung der Bündelblockausgleichung erfaßt),
- Objektpunkte, die weniger als dreimal gemessen wurden.

In diesem Arbeitsschritt werden die genannten Punkte automatisch eliminiert.

Punktidentitätskontrolle

Zur Bodenbewegungsanalyse werden identische Punkte in unterschiedlichen Epochen genutzt. Diese Punkte werden über die identische Punktnummer ermittelt.

Es können aufgrund verschiedenster Einflüsse Fehler auftreten. Identische Punkte haben dann ggf.:

- identische Punktnummer, identische Lage, unterschiedliche Punktart.
- identische Punktnummer, unterschiedliche Lage, identische Punktart.
- identische Punktnummer, unterschiedliche Lage, unterschiedliche Punktart.
- unterschiedliche Punktnummer, identische Lage, identische Punktart.
- unterschiedliche Punktnummer, identische Lage, unterschiedliche Punktart.

Diese Fehler werden von BOBESYS abgefangen und automatisiert bzw. teil-automatisiert bereinigt.

Fehlersuche Höhe

Die Fehlersuche erfolgt über die Höhendifferenzen identischer Punkte unterschiedlicher Epochen. Es werden für alle möglichen Epochenkombinationen – diese werden als Delta-Epochen benannt – die Höhendifferenzen berechnet (z.B. wird ein Punkt in der Epoche 1996, 1998 und 2000 gemessen. Folgende Delta-Epochen werden zur Fehlersuche betrachtet: 1996 – 1998, 1996 – 2000, 1998 – 2000).

Über diese Höhendifferenzen einer oder mehrerer Delta-Epochen erfolgt die Detektion und Zuordnung grober Fehler und nicht-bergbaubedingter vertikaler Bodenbewegungen.

Die Detektion wird auf der Grundlage einer robuste Flächenausgleichung über dynamische Teilflächenbildung durchgeführt. Durch Angabe eines prozentualen Wertes kann die Sicherheitswahrscheinlichkeit definiert werden, um grobe Fehler oder nicht-bergbaubedingte vertikalen Bodenbewegung zu ermitteln.

Nach der Detektion werden die Fehler und / oder Abweichungen einer oder mehreren Epochen zugeordnet. Diese endgültige Zuordnung erfolgt durch den Sachbearbeiter und wird durch Visualisierung zusätzlicher Geodaten, wie z.B. Realnutzung, Anpassungsmaßnahmen, aber auch der aktuellen Luftbilder, unterstützt.

Punkte deren Höhen als grob fehlerhaft oder als nicht-bergbauliche Änderung eingestuft werden, werden nicht aus der Punktdatenbank gelöscht sondern markiert, so dass diese Daten für spätere Epochenvergleiche ggf. weiter genutzt werden können.

Epochenvergleich (Höhe)

Mit den bereinigten und abschließend bearbeiteten Punktinformationen kann der eigentliche Epochenvergleich stattfinden. Es werden vom Sachbearbeiter zwei Epochen definiert und es findet dann eine Differenzbildung aller identischer Punkte statt. Mit diesen Höhendifferenzen wird der tatsächliche Senkungsverlauf über den gewichteten mehrstufigen B-Spline-Algorithmus (GMBA) berechnet.

Auf der mit dem GMBA berechneten Senkungsoberfläche werden für ein definiertes Raster zu jedem Rasterpunkt die Senkungen bzw. Höhenänderungen berechnet und gespeichert.

Ergebnispräsentation

Zur Präsentation der berechneten Senkungen können die ArcView-Erweiterungen SpatialAnalyst oder 3DAnalyst Anwendung finden. Es erfolgt hierbei eine Interpolation der Senkungsoberfläche über verschiedene Interpolations- bzw. Approximationsverfahren. Diese Methoden können allerdings nur zur Visualisierung herangezogen werden. Die Berechnung der „Linien gleicher Senkungen“ erfolgt über eine standardisierte Methode innerhalb von BOBESYS, um eine Wiederholbarkeit sicherzustellen. Aus diesem Grund können auch nur mit BOBESYS erzeugte „Linien gleicher Senkungen“ als Ergebnis eines Epochenvergleichs angesehen werden.

Arbeitsfortschritt

Mit diesem Modul werden die Bearbeitungsschritte für einen Epochenvergleich dokumentiert. Sämtliche durchgeführten Bearbeitungsschritte und deren Ergebnisse werden in einer Log-Datei gespeichert und der Sachbearbeiter hat die Möglichkeit diese über eine Oberfläche innerhalb von BOBESYS oder aber auch mit externen Werkzeugen anzusehen.

Beispiel einer Senkungsanalyse mit BOBESYS

Beispielhaft wird nachfolgend das Ergebnis einer mit dem System BOBESYS erfolgten Senkungsanalyse aufgezeigt. Bei den Testdaten handelt es sich um aerophotogrammetrisch bestimmte 3D-Koordinaten zweier Aufnahmezeiträume eines circa 4 km² großen städtischen Untersuchungsraumes. Die Luftbilder wurden in einem Abstand von acht Jahren aufgenommen.

Nach der Punktidentitätskontrolle verbleiben 1475 identische Punkte, die für einen Epochenvergleich genutzt werden können. Die Abbildung 4/links zeigt die Linien gleicher Höhenänderungen auf Basis 1475 identischer Punkte vor der Senkungsanalyse. Lokale Bereiche weisen unplausible Isolinienverläufe in Form von engen Scharungen, einem zackigen Verlauf und Inselfpolygone auf.

Die Senkungsanalyse ermittelt insgesamt 115 verfälschte Höhenänderungen, die ursachenbezogen zugeordnet werden können. Die verbleibenden 1350 Beobachtungen bilden die Basis der Senkungsoberflächenberechnung. Das Ergebnis der Senkungsanalyse, die plausiblen bergbaubedingten Senkungen, werden in Abbildung 5/rechts dargestellt.

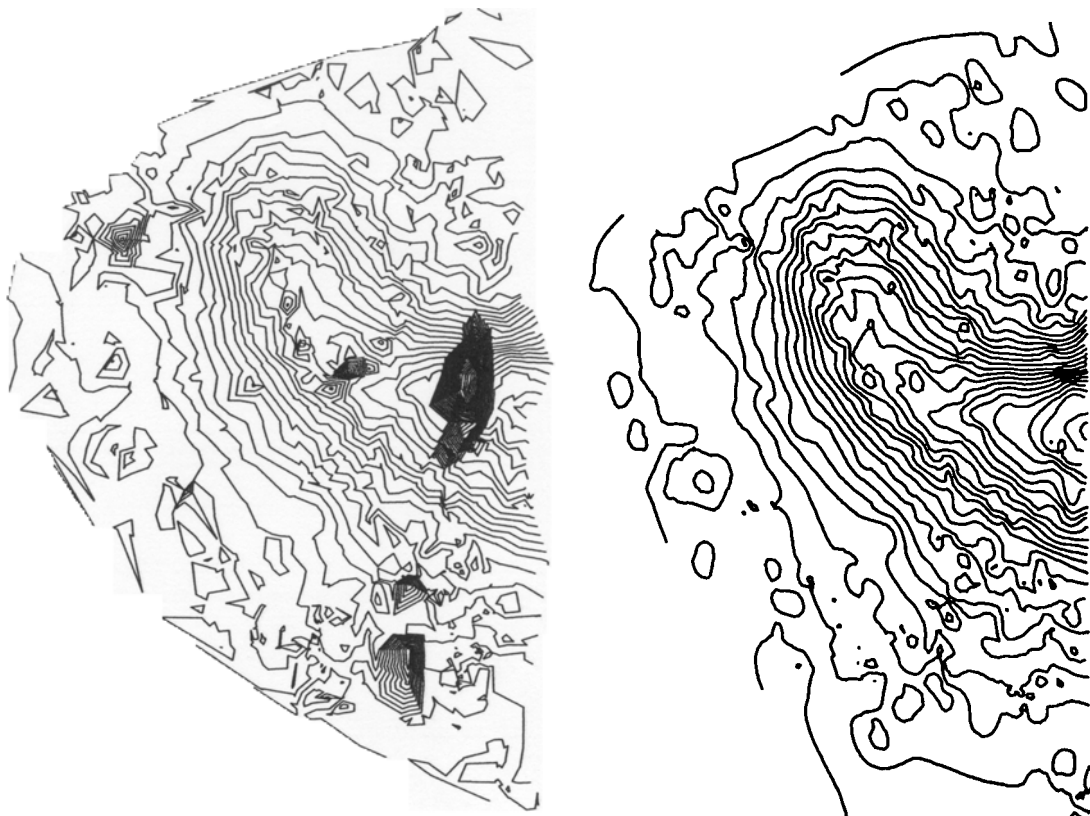


Abbildung 6: Links: Isolinien der Höhenänderungen.
Rechts: Isolinien der plausiblen bergbaubedingten Senkungen.

Fazit

Mit den mathematisch/statistisch gewonnenen Verdachtsmomenten, den thematischen Zusatzinformationen werden klare Entscheidungskriterien bereitgestellt werden, die eine eindeutige, reproduzierbare und nachvollziehbare Senkungsanalyse ermöglichen. Die automatische Ermittlung von Verdachtsmomenten reduziert die Plausibilitätsprüfung der Höhenänderungen auf ein Minimum und ermöglicht eine gezielte Suche nach verfälschten Höhenänderungen. Die Funktionalitäten und das Datenmodell des DV-Systems ermöglichen einen automatisierten Ablauf unter Berücksichtigung eines standardisierten Workflows.

Eine deutliche Verringerung des Bearbeitungsaufwandes sowie die qualitative Verbesserung der ermittelten großflächigen Senkungen konnte an Testdaten nachgewiesen werden. Der Arbeitsumfang kann mit Hilfe des Systems auf 1/4 der ursprünglichen Bearbeitungszeit reduziert werden.

Ausblick

Das Luftbild ist die wesentliche Informationsquelle bei der ursachenbezogenen Zuordnung verfälschter Höhenänderungen, da in ihm unmittelbar Veränderungen der Oberfläche erkannt werden können. Um den Zugriff auf die Luftbilder zu vereinfachen und somit zu beschleunigen, sind Luftbildarchive bereitzustellen. Mittelfristig werden die analytischen photogrammetrischen Messungen durch den Einsatz neuer GPS-gestützter digitaler Aufnahmesysteme bzw. höchstauflösender multispektraler Sensoren und durch eine automatische digitale Auswertetechnik ersetzt. Durch den Einsatz multispektraler Sensoren werden attributive Daten exakter und gleichzeitig zahlreicher vorliegen. Hierdurch können flächendeckend Realnutzungen für alle Epochen wirtschaftlich vorgehalten werden, so dass auch eine ursachenbezogene Zuordnung der verfälschten Höhenänderungen automatisiert erfolgen kann.

Eine Optimierung des Modellierungssalgorithmusses (muss vorher mal genannt werden) kann durch die Berücksichtigung der Geometrie über eine Balancierung [JURISCH et. Al 1999, KAMPMANN 1997, LINKE 200] bei der L_1 -Normausgleichung erreicht werden.

Quellennachweis

- [BBergG] Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. S. 1310), zuletzt geändert durch Gesetz vom 26. Januar 1998.
- [BUSCH] Großräumige photogrammetrische Bodenbewegungsmessungen. Das Markscheidewesen, Heft 4, (1989), S. 323 – 327.
- [JURISCH und KAMPMANN] Eine kleine Einführung über die Balancierung in der Ausgleichung. Beiträge zur Wissenschaft, Technologie und Gestaltung, Fachhochschule Anhalt, Heft 46 (1999)
- [LINKE] Zur Analyse der Geometrie und Beurteilung von geodätischen und mechanischen Netzen unter Verwendung von Balancierungsfaktoren. Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Heft 3 (2000).
- [RUTISHAUSER] Vorlesungen über numerische Mathematik. Band 1: Gleichungssysteme, Interpolation und Approximation. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart 1976.
- [STREERATH] Analyse und Modellierung großräumiger bergbaubedingter Senkungen aus photogrammetrischen Beobachtungen. Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Heft 4 (2001).