

# Modellierung und Bewertung der Stabilität von Tagebaukippen mit künstlichen neuronalen Netzen (advangeo® prediction software)

ROSCHER, M.<sup>1</sup>, KNOBLOCH, A.<sup>1</sup>, KALLMEIER, E.<sup>1</sup>, BARTH, A.<sup>1</sup>, DREBENSTEDT, C.<sup>2</sup>, LUCKE, B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Beak Consultants GmbH, Am St. Niclas Schacht 13, 09599 Freiberg

<sup>2</sup> TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

<sup>3</sup> LMBV Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH  
T: +49 (0) 3731 781 383, F: +49 (0) 3731 781 352, E: [marco.roscher@beak.de](mailto:marco.roscher@beak.de)

## Zusammenfassung

Der Bewertung der Stabilität von unverdichteten Tagebaukippen wurde in den letzten Jahren infolge unerwartet eingetretener geotechnischer Ereignisse vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Mit der Einstellung des Abbaus in der Mehrzahl der Braukohletagebaue in der Lausitz wurde der Grundwasserspiegel nicht mehr künstlich abgesenkt. Der Grundwasseranstieg führte zu Veränderungen der Standsicherheit von ursprünglich überwiegend trocken durch Abraumförderbrücken aufgeschütteten Kippen. Während der Aufsättigung führten eintretende Spannungsvänderungen im Kippenkörper, hier insbesondere im oberen wassererfüllten Kippenteil, häufig zu sehr labilen Korngerüsten (weitere Auflockerung) und ungünstigen Porenfluidsituationen (differenzierte Sättigung/Durchlässigkeiten/Porendrucke). Teilweise wurden dadurch im Zusammenwirken mit sehr ungünstigen Witterungssituationen (hoher Niederschlag, Frost, Wind) Verflüssigungsprozesse initiiert, die zu teils großräumigen Setzungsfließen bzw. Geländeeinbrüchen führten. Die damit verbundenen Deformationsprozesse an der Oberfläche der Kippen sind wegen der auftretenden Gefährdungen bei der öffentlichen Flächennutzung bzw. -bewirtschaftung nicht tolerierbar. Entsprechende Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen sind erforderlich und eingeleitet. Aufgrund der Anzahl von Ereignissen und dem weiter fortschreitenden Grundwasseranstieg ist es von großem Interesse Gefährdungsbereiche möglichst frühzeitig zu erkennen. Für die Erstellung von Gefährdungskarten vor allem in den Innenkippenbereichen können eine Vielzahl von Daten verwendet werden. Neben den geometrischen Daten die den Kippenkörper beschreiben, gibt es Daten über die stoffliche Zusammensetzung, die Lage und Dynamik des Grundwasserspiegels und geotechnische Kennwerte der Kippe. All diese verschiedenen Daten sollen zukünftig mit dem Ziel einer flächengenauen Prognose in einem System zusammengefasst und komplex ausgewertet werden (**I**ntegriertes **K**ippen**S**icherheits- und **B**ewertungssystem – IKSB). Dazu wird im Rahmen eines Entwicklungsvorhabens der LMBV die advangeo® prediction software eingesetzt. Sie bietet die Möglichkeit die Verfahren der künstlichen neuronalen Netze (KNN) in einer GIS Umgebung anzuwenden. KNN's können genutzt werden um unbekannte nichtlineare Zusammenhänge zwischen verschiedensten Parametern und einem bekannten Ereignis zu finden. Die Entwicklung und Testung des IKSB erfolgt an dem Pilotprojekt des Tagebaus Schlabendorf Süd im stark von geotechnischen Ereignissen betroffenen Nordraum des Lausitzer Reviers. Auf der Basis der vorhandenen Daten soll untersucht werden ob es möglich ist verlässliche flächenscharfe Prognosekarten für die lokale Gefährdung in den Bereichen der Innenkippe zu erstellen. Erste Ergebnisse zeigen dass die Methode wirkungsvoll und schnell eingesetzt werden kann. Des Weiteren bestätigt sich die Annahme dass es nicht ausreicht nur die Hangneigung der Oberfläche, den Grundwasserflurabstand und die Mächtigkeit der bereits gesättigten Kippe zu berücksichtigen. In weiteren Schritten werden die Stoffliche Zusammensetzung der Kippe, Trennflächen innerhalb der Kippe, technologisch bedingte Eigenschaften der Kippe und Daten zur unterliegenden Geologie mit in das Auswertungssystem integriert.

## 1. Einleitung

Bewegungen der Erdoberfläche in Innenkippenbereichen der Lausitzer Braunkohletagebaue stellen eine Gefährdung für die Nachnutzung der Bergbaufolgelandschaft dar. Durch den Grundwasseranstieg nach Beendigung der Abbautätigkeiten verändert sich die Standsicherheit der geschütteten Kippenkörper. Dies zeigt sich vor allem durch spontane schnelle Geländedeformationen die teilweise mit Verflüssigungsereignissen einhergehen. Dabei ist derzeit nicht zwischen ursächlichen Kippenbodenverflüssigungen mit Geländeeinbruch/Setzungsfließen und nachgeholt Sackungen mit sekundärer Verflüssigung zu unterscheiden. Obgleich die auslösenden Mechanismen nicht endgültig geklärt sind, ist es von großem Interesse eine räumliche Abschätzung über das Gefährdungspotential zu erstellen. Für derartige Prognosen stehen zwei grundlegende Methoden zur Verfügung. Zum einen gibt es wissensgetriebene Methoden die auf dem Verständnis der Prozesse beruhen die zum Ereignis führen. Zum anderen existieren datengetriebene Ansätze die ohne detailliertes Wissen über die Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und dem Ereignis auskommen, aber immer über Trainingsereignisse geeicht werden müssen. Im hier vorliegenden Fall der Oberflächendeformationen im Innenkippenbereich kann ein datengetriebenes System aufgrund der Vielzahl an Trainingsereignissen sehr zielführend eingesetzt werden. In Schlabendorf-Süd ist dies auf Grund der Vielzahl der gegangenen Geländeeinbrüche und Setzungsfließen aussichtsreich und soll anschließend auf andere Sanierungsgebiete übertragen werden. Dazu wurde die Anwendung advangeo® prediction software der Firma Beak Consultants GmbH eingesetzt. Dieses Programm nutzt das selbst lernende Verfahren der künstlichen neuronalen Netzwerke als mathematischen Kern für die Erstellung von Prognosen. Dazu werden dem System verschiedene Eingangsdaten zur Verfügung gestellt, die potentiell Informationen über die flächige Verteilung von Deformationsereignissen enthalten. Anhand von vorgegebenen Trainingspunkten (d.h. bekannte Ereignisse) ermittelt die Software innerhalb kürzester Zeit die Abhängigkeit der Ereignisse von den verfügbaren Eingangsdaten und ist in der Lage flächenhafte Prognosen zu berechnen. Mit Hilfe eines backward propagation Algorithmus werden in einem iterativen Prozess schrittweise die Gewichte des Informationstransfers zwischen den Neuronen so verändert, dass der Fehler zwischen beobachtetem Ereigniss und dem jeweiligen Rechenergebniss minimiert wird (Abbildung 1).

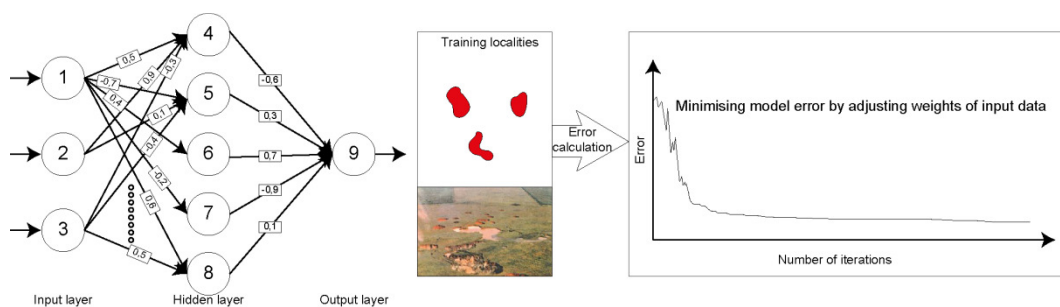


Abbildung 1: Verfahrensprinzip der Prognose mit künstlichen neuronalen Netzen

## 2. Datengrundlage und -aufbereitung

Alle in diesem Projekt verwendeten Daten wurden von der LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH) zur Verfügung gestellt. Testobjekt für das hier vorgestellte Vorhaben ist die Innenkippe des Tagebaus Schlabendorf Süd. Für die Charakterisierung der Kippe wurde aufgrund der Datenlage eine Auflösung von 25 x 25 m gewählt. Damit enthält das Untersuchungsgebiet 52 269 Zellen. Grundlegende geometrische Daten liegen durch Vermessungen der Kippenbasis sowie der Oberkante der Abraumförderbrücken (AFB)-Kippe vor. Die Oberflächenmorphologie wird flächendeckend und hochauflösend

durch verschiedene Laser Scan Befliegungen gemessen. Diese Daten liegen flächendeckend für die Jahre 2000, 2002 (jeweils noch mit geringerer Genauigkeit), 2005, 2010 und 2011 vor.

Verfügbare Daten:

- Geometrische Daten des Kippenkörpers
  - Tagebaubasis
  - Oberfläche der AFB Kippe
  - Lage und Alter der Kippen- und Abbauscheiben
- Grundwasserspiegel-Daten
- Erwarteter GW-Endzustand
- Ausdehnung der Pflugkippe
- Bohrungsdaten der Vorfeldgeologie und Kippenbohrungen
- Geotechnische Kennwerte in einzelnen Bereichen der Kippe
- Lage und Art von geotechnisch relevanten Sanierungsmaßnahmen
- Geologische Karte des Untergrundes
- Flächennutzungskarte

Folgende abgeleitete Daten können berechnet werden:

- Mächtigkeit der AFB-, Pflug- und Gesamtkippe
- Mächtigkeit der gesättigten und ungesättigten Kippe
- Anteil der gesättigten Kippe an der Gesamtkippe
- Grundwasserflurabstand
- Jährlicher Grundwasseranstieg
- Grundwasserfließrichtung und hydraulischer Gradient
- Grundwasserabstand von der AFB-Pflugkippen-Trennfläche
- Morphologische Einzelparameter ausgewählter Flächen
  - Hangneigung
  - Ausrichtung des Hanges
  - Krümmung der Oberfläche
  - Akkumulation von abfließendem Wasser unter Annahme einer kompletten Versiegelung
- Verteilung bindigen Materials im abgebauten Vorfeld
- Schüttungs- und Abbaurichtungen

### **3. Trainingsgebiete**

Im Bereich des Tagebaus Schlabendorf Süd sind 34 Ereignisse im Zeitraum zwischen dem 6.6.2006 und dem 1.6.2011 bekannt. Als Geländeeinbrüche, die sich ausschließlich durch Vertikalbewegungen auszeichnen, wurden 19 Ereignisse eingestuft und die restlichen 15 Geländebrüche weisen zum Teil erhebliche horizontale Bewegungen auf und werden daher als Setzungsfließen klassifiziert. Als Trainingsdaten für die Prognose von Kippenoberflächendeformationen müssen immer Ereignisregionen ausgewählt werden die zu den im Modell verwendeten Eingangsdaten in zeitlichem Bezug stehen. In der hier präsentierten Fallstudie werden ausschließlich Daten aus dem Jahr 2010 verwendet und somit auch nur Ereignisse von denen sicher gesagt werden kann das sie 2010 entstanden sind. Als Trainingsdaten konnten 6 Geländebrüche und 6 Geländeeinbrüche für die Prognose von Deformationsereignissen herangezogen werden (Abbildung 3 – 6).

#### 4. Resultate

Erste Testläufe zeigen dass die Software Zusammenhänge zwischen den bekannten Ereignissen und den Eingangsdaten erkennt. Durch das sukzessive Hinzufügen von Eingangsparametern kann der Einfluss einzelner Faktoren abgeschätzt werden. Hier soll das Potential der Methodik am Beispiel von drei Parametern verdeutlicht werden. Dazu wurden die Hangneigung der Kippenoberfläche, der Grundwasserflurabstand und die Mächtigkeit der bereits gesättigten Kippe ausgewählt. Die folgenden Darstellungen (Abbildung 3 – 6) sind Prognosekarten die mit der advangeo® prediction software erstellt wurden. Bei der gewählten Farbgebung werden Bereiche hoher Wahrscheinlichkeit in Rot aus und niedrige in Blau. Die zum Training verwendeten Gebiete der Geländebrüche sind durch eine schwarze Kontur gekennzeichnet und die Geländeeinbrüche durch eine violette. Bei der Auswertung der Einzelparameter (Abbildung 3) zeigt sich das große Hangneigungen der Oberfläche (Böschungen) ein erhöhtes Potential für Bruchereignisse darstellen. Der Einfluss des Grundwasserflurabstandes beschränkt sich auf Regionen in denen keine Wasserflächen und große Grundwasserflurabstände vorhanden sind. Die Mächtigkeit der gesättigten Kippe ist offensichtlich nur im Süden und Osten des Tagebaues hoch genug um bruchartige Oberflächendeformationen durch Sackungsprozesse zu ermöglichen.

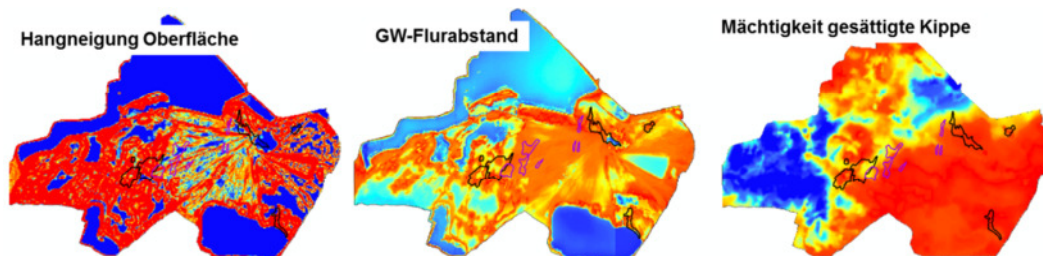


Abbildung 2: Prognosekarten für das Auftreten von oberflächlichen Bruchereignissen auf der Basis von Einzelparametern (Farbcodierung siehe Text)

Die schrittweise Kombination der Einzelparameter (Abbildung 4) zeigt, dass die Mächtigkeit der gesättigten Kippe einen großen Einfluss auf das Gefährdungspotential hat: jeweiligen Modellrechnungen weisen für den westlichen Teil der Kippe ein geringes Gefährdungspotential aus. Die Einbeziehung der Hangneigung in die Prognose verdeutlicht die bodenmechanische Tatsache, dass geneigte Flächen/Böschungen gefährdeter für Bruchvorgänge sind. Die Berücksichtigung des Grundwasserflurabstandes bewirkt dass die Bereiche der Seeflächen und der mächtigeren ungesättigten Kippe als weniger gefährdet eingestuft werden. Dies ist ebenfalls plausibel, weil bei größeren Grundwasserflurabständen Verflüssigungsvorgänge in der wassergesättigten Kippe die Oberfläche nicht erreichen oder weniger beeinflussen.

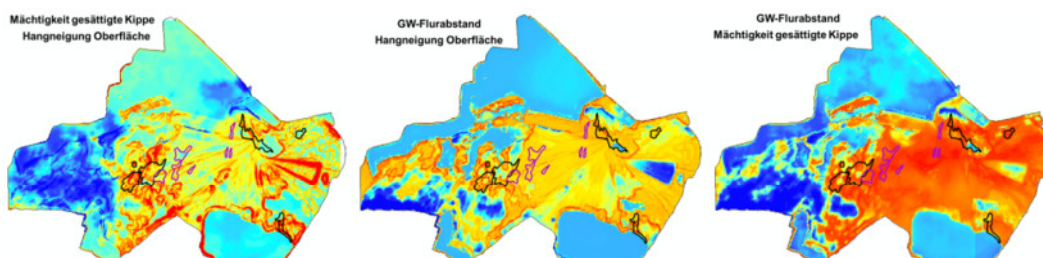


Abbildung 3: Prognosekarten für das Auftreten von oberflächlichen Bruchereignissen auf der Basis von binären Parameterkombinationen (Farbcodierung siehe Text)

Die Modellierung, die auf alle drei ausgewählten Parameter zurückgreift (Abbildung 5) zeigt dass der östliche Bereich der Kippe großflächig deutlich gefährdeter als der westliche ist. Zusätzlich zeigt sich, dass auftretende Neigungen der Kippenoberfläche das Gefährdungspoten-



tial lokal erhöhen. Aufgrund dieser drei Parameter lassen sich jedoch nur wenige hoch gefährdete Gebiete lokal eingrenzen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass (1) die genutzten Eingangsdaten nicht ausreichen, um differenzierte Prognosen für die lokale Gefährdung der Kippe in Bezug auf die Bruchereignisse zu erstellen oder (2) Daten berücksichtigt wurden die keinen Einfluss auf die Ereignisse haben oder (3) verschiedenartige Ereignisse für das Training verwendet wurden.

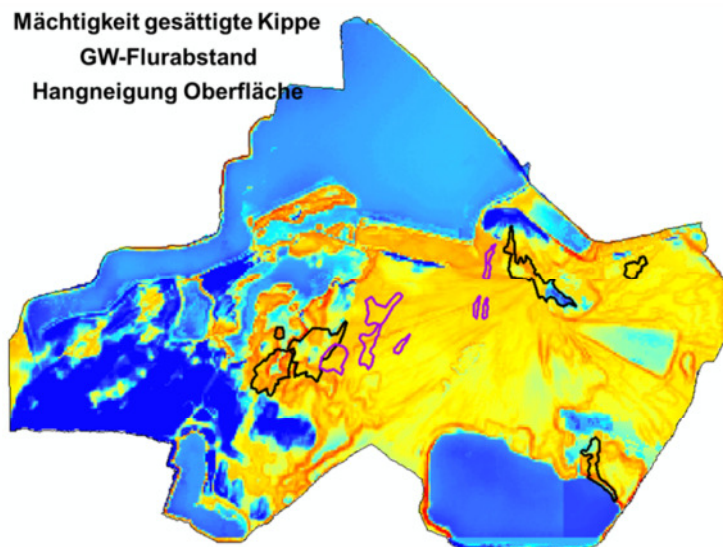


Abbildung 4: Prognosekarten für das Auftreten von oberflächlichen Bruchereignissen auf der Basis drei Parametern (Farbcodierung siehe Text)

Werden die beiden Typen der Bruchereignisse getrennt betrachtet, ergeben sich sehr unterschiedliche Gefährdungsprognosen (Abbildung 6). Geländeeinbrüche treten vor allem im nahezu ebenen Gelände auf. Daraus leitet sich der Einfluss der Oberflächenneigung auf das Resultat ab. Die Mächtigkeit der gesättigten Kippe hat einen geringeren Einfluss. Der Grundwasserflurabstand ist in dieser Modellierung der einflussreichste Parameter für die Prognose von Geländeeinbrüchen.

Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Gefährdungsregionen für Geländebrüche erheblich. Die Hangneigung der Oberfläche bildet den wichtigsten Einflussfaktor für deren Auftreten. Sämtliche Böschungen im Tagebau Schlabendorf Süd werden als gefährdet eingestuft.

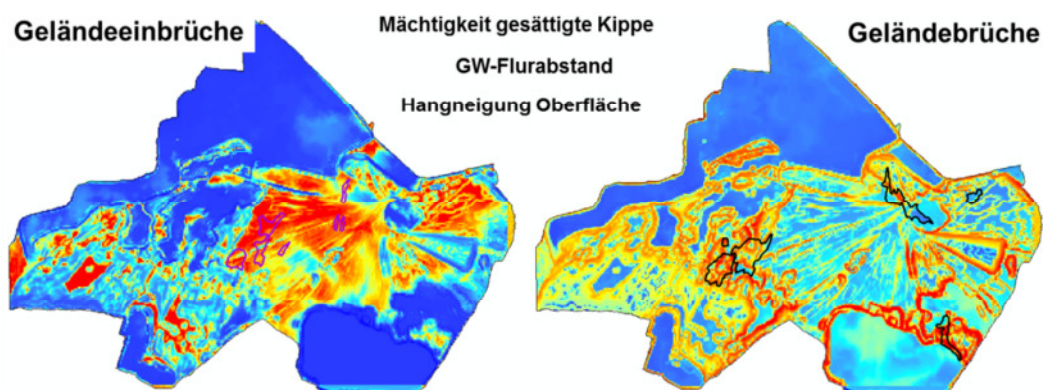


Abbildung 5: Prognosekarten für das Auftreten von Geländebrüchen und Geländeeinbrüchen auf der Basis von drei Parametern (Farbcodierung siehe Text)

Die in Abbildung 6 gezeigten Gefährdungskarten verbessern die undifferenzierte Prognosekarte aus Abbildung 5 deutlich. Die Kombination beider Ereignistypen während des Trainings

des neuronalen Netzes führt zu einer Kombination der gegensätzlichen erkennbaren Zusammenhänge. Dafür können drei mögliche Erklärungen gefunden werden. (1) Geländebrüche haben andere Entstehungsbedingungen als Geländeeinbrüche, (2) die dem System zur Verfügung gestellten Daten reichen nicht aus um Rückschlüsse auf die Entstehungsbedingungen der Brüche zu ziehen oder (3) es sind in der Modellierung Daten berücksichtigt worden die keinen ursächlichen Einfluss auf die Entstehung der Ereignisse haben. Da es fließende Übergänge zwischen Geländeeinbrüchen und Geländebrüchen gibt kann ein unterschiedlicher Zusammenhang zwischen den Eingangsfaktoren und den Oberflächendeformationen ausgeschlossen werden. Somit bleibt festzustellen dass bedeutend mehr Daten in der Modellierung berücksichtigt werden müssen und deren Sensitivität getestet werden muss.

## 5. Ausblick

Für weitere Modellierungen werden zurzeit die Daten zur Trennfläche zwischen der Pflugkippe und der AFB Kippe aufbereitet. Ein Zusammenhang zwischen der Rippenstruktur der AFB Kippe und den Umrissen der bekannten Brüche ist offensichtlich (Abbildung 7). Für weitere Untersuchungen werden für jede Zelle des Modells die Winkel zwischen Hangneigungsrichtung der Trennfläche und der Verkippungsrichtung sowie zwischen der Hangneigung und der Grundwasserströmungsrichtung herangezogen. Zusätzlich kann die Krümmung (konvex/konkav) der Pflugkippenbasis wichtige Informationen enthalten.

Der Zusammenhang zwischen der Materialzusammensetzung und der Verflüssigungsgefährdung ist hinlänglich bekannt. Zu dessen Beschreibung wird die aus den Vorfeldbohrungen bekannte Geologie zur Abschätzung der Zusammensetzung der Kippe genutzt. Die Lage der bekannten Ereignisse zeigt deutlich, dass diese nur in Bereichen auftreten in denen das zugehörige Vorfeld weniger als 20 % bindiges Material enthält (Abbildung 7). Für die Bestätigung dieser materialtypischen Zusammenhänge ist auch die Integration ausgewählter Drucksondierparameter (Reibungsverhältnis, Spitzendruck) vorgesehen.

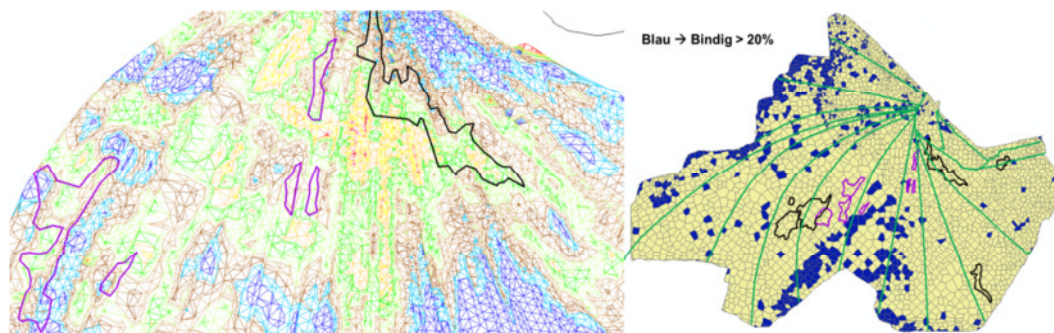


Abbildung 6: links: farbcodierte Höhenlage des AFB-Reliefs unter der Pflugkippe (blau = hoch, rot = niedrig, violette Kontur = Geländeeinbruch, schwarze Kontur = Geländebruch) (verändert nach Götz), rechts: Anteil bindigen Materials im Vorfeld des Abbaus (grüne Linien = Lage der Abbaukanten verschiedener Jahre, Abbaurichtung im Uhrzeigersinn)

Im Rahmen einer umfassenden Sensitivitätsanalyse des Systems werden die Parameterabhängigkeiten im Einzelnen und im Komplex weiter untersucht. Zielstellung ist dabei die Herausarbeitung signifikanter Parameterkombinationen für die weitgehend reale Erfassung und flächenhafte Abbildung der Bruchgefährdung der unverdichteten Kippen in Gefährdungskarten für die einzelnen Sanierungsgebiete. Die ersten Prognoserechnungen mit dem System lassen eine sehr flexible und schnelle Variation von Parameterkombinationen erkennen. Der dieser Entwicklung zugrunde liegende datengetriebene Ansatz könnte somit schnelle Ergebnisse und Unterstützung für wissensgetriebene Gefährdungsabschätzungs- sowie Nachweisverfahren (GFKippe, Stabilitätsnachweis) eröffnen.