

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

*Dr. Marco Roscher, Dipl.-Geol. Andreas Knobloch, Dipl.-Geol. Enrico Kallmeier, Dr. Andreas Barth, Prof. Dr. Carsten Drebenstedt, Freiberg; Dipl.-Ing. Beate Lucke, Senftenberg\**

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 Braunkohle-tagebaue in der Lausitz, wurde der Grundwasserspiegel nicht mehr künstlich abgesenkt. Der Grund-

wasseranstieg führte zu Veränderungen der Standsicherheit von ursprünglich überwiegend trocken durch Abraumförderbrücken aufgeschüttete Kippen. Während der Aufsättigung führten eintretende Spannungsveränderungen im Kippenkörper, hier insbesondere im oberen wassererfüllten Kippen-teil, häufig zu sehr labilen Korngestüben (weitere Auflockerung) und ungünstigen Porenfluidsituationen (differenzierte Sättigung/Durchlässigkeiten/Porendrücke). Teilweise wurden dadurch im Zusammenwirken mit sehr ungünstigen Witterungssituationen (hoher Niederschlag, Frost, Wind) Verflüssigungsprozesse initiiert, die zu teils großräumigem Setzungsließen 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, kann 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 (Integriertes Kippen-Sicherheits- und Bewertungssystem – 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 unbekanntes, nichtlineare Zusammenhänge zwischen verschiedensten Parametern und einem bekannten Ereignis zu finden. Die Entwicklung und Erprobung 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.

*Dr. Marco Roscher*  
Beak Consultants GmbH  
Am St. Niclas Schacht 13  
09599 Freiberg  
Tel.: 03731/781343  
Fax: 03731/781352  
**E-Mail: marco.roscher@beak.de**  
**Internet: www.beak.de**

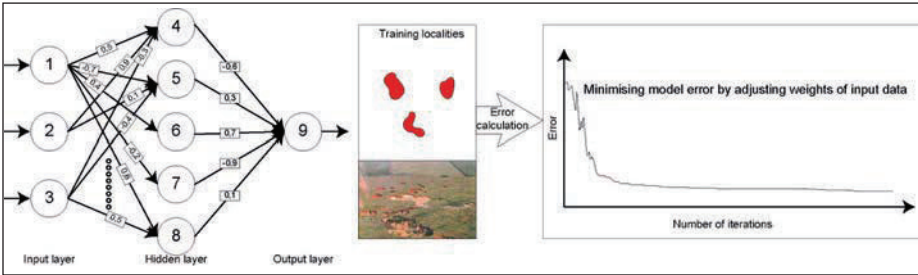
*Dipl.-Geol. Andreas Knobloch*  
Beak Consultants GmbH  
Am St. Niclas Schacht 13  
09599 Freiberg  
Tel.: 03731/781359  
Fax: 03731/781352  
**E-Mail: andreas.knobloch@beak.de**  
**Internet: www.beak.de**

*Dipl.-Geol. Enrico Kallmeier*  
Beak Consultants GmbH  
Am St. Niclas Schacht 13  
09599 Freiberg  
Tel.: 03731/781383  
Fax: 03731/781352  
**E-Mail: enrico.kallmeier@beak.de**  
**Internet: www.beak.de**

*Dr. Andreas Barth*  
Beak Consultants GmbH  
Am St. Niclas Schacht 13  
09599 Freiberg  
Tel.: 03731/781348  
Fax: 03731/781352  
**E-Mail: andreas.barth@beak.de**  
**Internet: www.beak.de**

*Prof. Dr. Carsten Drebenstedt*  
TU Bergakademie Freiberg  
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau  
Gustav-Zeuner-Str. 1A  
09596 Freiberg  
Tel.: 03731/393373  
Fax: 03731/393581  
**E-Mail: drebenstedt@mabb.tu-freiberg.de**  
**Internet: www.tu-freiberg.de**

*Dipl.-Ing. für Geotechnik*  
*Beate Lucke*  
Abteilung Geotechnik Grundsätze  
Knappenstr. 1  
01968 Senftenberg  
Tel.: 03573/844166  
Fax: 03573/844623  
**E-Mail: Beate.Lucke@lmbv.de**



1 Verfahrensprinzip der Prognose mit künstlichen neuronalen Netzen

## Allgemeines

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/Setzungsließen und nachgeholten 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 2 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 vergangenen Geländeeinbrüche und Setzungsließen 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 Ereignis und dem jeweiligen Rechenergebnis minimiert wird (Bild 1).

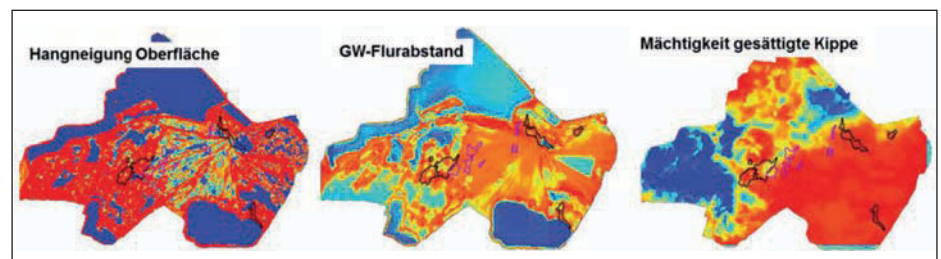
## Datengrundlage und -aufbereitung

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 52269 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

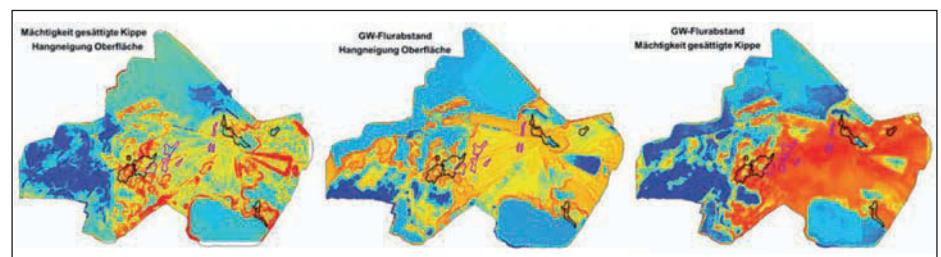
Scan- Befliegungen gemessen. Diese Daten liegen flächendeckend für die Jahre 2000, 2002 (jeweils noch mit geringerer Genauigkeit), 2005, 2010 und 2011 vor.

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 Vorfelddgeologie 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



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



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



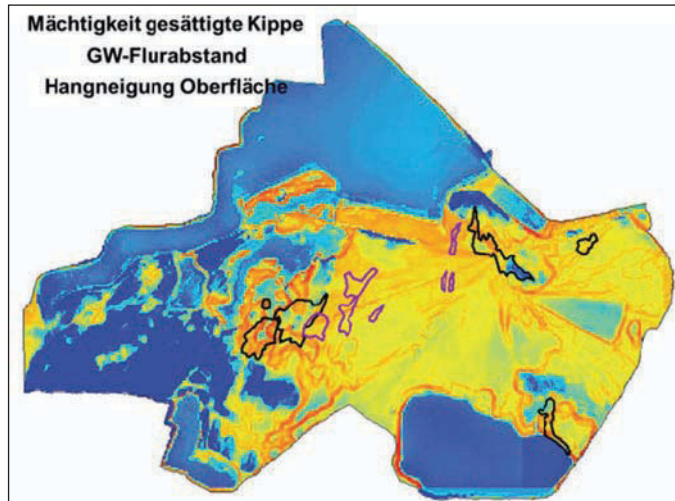
- Verteilung bindigen Materials im abgebauten Vorfeld
- Schüttungs- und Abbaurichtungen

### Trainingsgebiete

Im Bereich des Tagebaus Schlabendorf- Süd sind 34 Ereignisse im Zeitraum zwischen dem 06.06.2006 und dem 01.06.2011 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 Setzungsließen 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, dass sie 2010 entstanden sind. Als Trainingsdaten konnten 6 Geländebrüche und 6 Geländeeinbrüche für die Prognose von Deformationsereignissen herangezogen werden (Bilder 3 bis 6).

### 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 3 Parametern verdeutlicht werden. Dazu wurden die Hangneigung der Kippenoberfläche, der Grundwasserflurabstand und die Mächtigkeit der bereits gesättigten Kippe ausgewählt. Die folgenden Darstellungen (Bilder 3 bis 6) sind Prognosekarten, die mit der advangeo® prediction software erstellt wurden. Bei der gewählten Farbgebung werden Bereiche hoher Wahrscheinlichkeit in Rot ausgewiesen und niedriger 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 (Bild 3) zeigt sich, dass 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 vor-



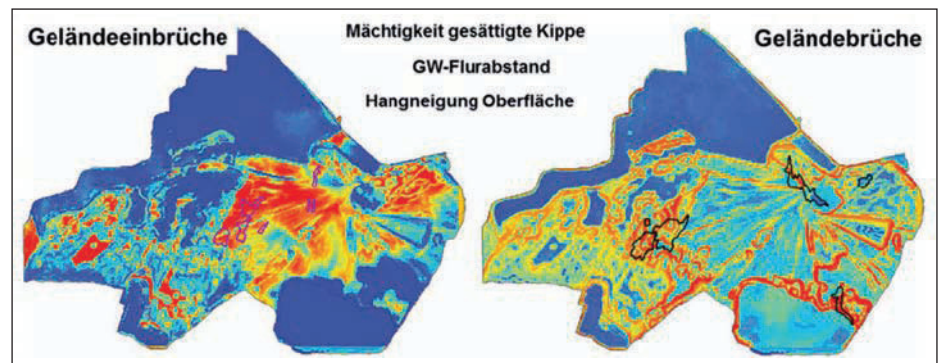
4 Prognosekarten für das Auftreten von oberflächlichen Bruchereignissen auf der Basis von 3 Parametern (Farbcodierung siehe Text)

handen sind. Die Mächtigkeit der gesättigten Kippe ist offensichtlich nur im Süden und Osten des Tagebaues hoch genug, um bruchartige Oberflächendeformationen durch Sackungsprozesse zu ermöglichen. Die schrittweise Kombination der Einzelparameter (Bild 4) zeigt, dass die Mächtigkeit der gesättigten Kippe einen großen Einfluss auf das Gefährdungspotential hat: jeweilige 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

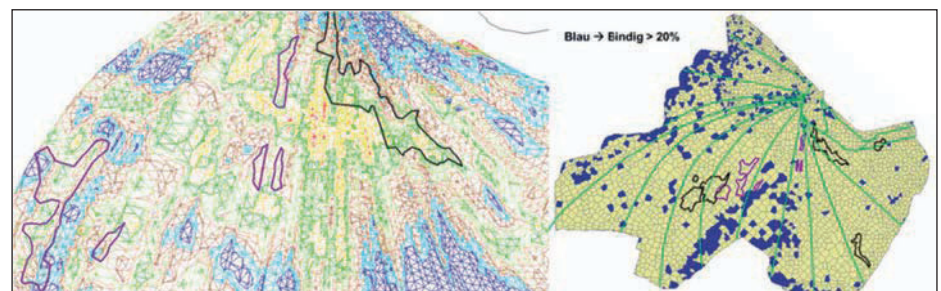
für Bruchvorgänge sind. Die Berücksichtigung des Grundwasserflurabstandes bewirkt, dass die Bereiche der Seeflächen und der mächtigeren ungesättigten Kippe als weniger gefährdet eingestuft werden. Dies ist ebenfalls plausibel, weil bei größeren Grundwasserflurabständen Verflüssigungsvorgänge in der wassergesättigten Kippe die Oberfläche nicht erreichen oder weniger beeinflussen.

Die Modellierung, die auf alle 3 ausgewählten Parameter zurückgreift (Bild 5), zeigt, dass der östliche Bereich der Kippe großflächig deutlich gefährdeter ist, als der westliche. Zusätzlich zeigt sich, dass auftretende Neigungen der Kippenoberfläche das Gefährdungspotential lokal erhöhen. Aufgrund dieser 3 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.

Werden die beiden Typen der Bruchereignisse getrennt betrachtet, ergeben sich



5 Prognosekarten für das Auftreten von Geländebrüchen und Geländeeinbrüchen auf der Basis von 3 Parametern (Farbcodierung siehe Text)



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)

sehr unterschiedliche Gefährdungsprognosen (Bild 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.

Die in Bild 6 gezeigten Gefährdungskarten verbessern die undifferenzierte Prognosekarte aus Bild 5 deutlich. Die Kombination beider Ereignistypen während des Trainings des neuronalen Netzes führt zu einer Kombination der gegensätzlichen erkennbaren Zusammenhänge.

Dafür können 3 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 Oberflächen deformationen ausgeschlossen werden. Somit bleibt festzustellen, dass bedeutend mehr Daten in der Modellierung berücksichtigt werden müssen und deren Sensitivität getestet werden muss.

### 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 (Bild 7). Für weitere Untersuchungen werden für jede Zelle des Modells die Winkel zwischen Hangneigungsrichtung der Trennfläche und der Verkipprichtung 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 (Bild 7). Für die Bestätigung dieser materialtypischen Zusammenhänge ist auch die Integration ausgewählter Drucksondierparameter (Reibungsverhältnis, Spitzendruck) vorgesehen.

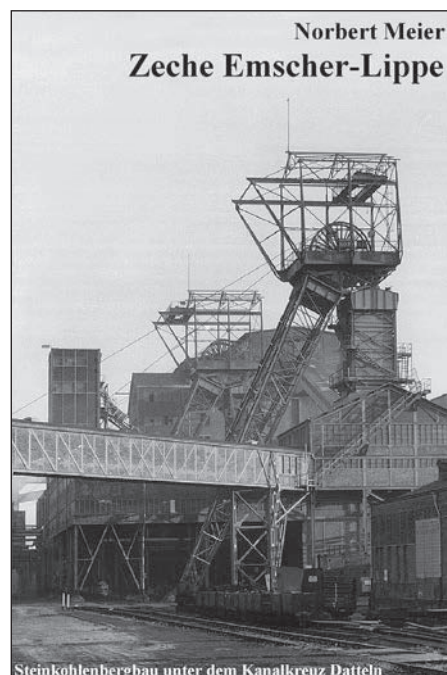
Im Rahmen einer umfassenden Sensitivitätsanalyse des Systems werden die Parameterabhängigkeiten im Einzelnen und im Komplex weiter untersucht. Zielstellung ist dabei, die Herausarbeitung signifikanter Parameterkombinationen für die weitgehend reale Erfassung und flächenhafte Abbildung der Bruchgefährdung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

## Buchbesprechung

### Zeche Emscher-Lippe Steinkohlenbergbau unter dem Kanalkreuz Datteln

Im Februar 1972 stellte die Dattelner Zeche Emscher-Lippe ihre Förderung ein, Ende November 1983 erloschen auch die letzten Öfen der Kokerei. Von den ehemaligen Betriebsanlagen, die über Jahrzehnte das Stadtbild des Ortes prägten, ist so gut wie nichts geblieben. Lediglich das Kraftwerk, in den 1960er Jahren von der Zeche errichtet, ist bis heute in Betrieb. Es produziert Bahnstrom und versorgt einen Großteil der Haushalte von Datteln mit Fernwärme. Doch auch dessen Tage sind gezählt und seine Betriebseinstellung wird in naher Zukunft erfolgen.

Der Steinkohlenbergbau hat die Entwicklung Dattelns vom verschlafenen Dorf zur blühenden Industriegemeinde maßgeblich beeinflusst und geprägt. Mit seinem Wegbrechen wurde die Stadt zu einem gravierenden und langwierigen Strukturwandel gezwungen, der bis heute nicht bewältigt scheint. Selbst neu angesiedelte Industriebetriebe mussten in den letzten Jahren wieder geschlossen werden.



Den jüngeren Bürgern der Stadt ist die Bergbauvergangenheit von Datteln kaum bekannt, nur die wenigsten älteren Einwohner haben diese Zeit selber miterlebt, denn seit der Zechenstilllegung sind mittlerweile über 40 Jahre vergangen. Durch dieses Buch wird die Bergbaugeschichte der Stadt in Wort und Bild umfassend aufgearbeitet und soll mit all ihren Höhen und Tiefen für nachfolgende Generationen erhalten werden.

432 Seiten, Format DIN A4, gebunden, über 750 z.T. großformatige Abbildungen  
Preis 24,95 €, ISBN 978-3-00-043004-6

Das Buch ist in Dattelner Buchhandlungen, in den Buchshops der LWL-Industriemuseen und auf der Zeche Zollverein erhältlich, man kann es aber auch unter der Emailadresse

**zecheemscherlippe@yahoo.de**

direkt bestellen, der Versand ist kostenfrei.

Norbert Meier

Förderverein Bergbauhistorischer Stätten  
Ruhrrevier e.V.