

Zeitliche und räumliche Prognose der Stabilität von Braunkohletagebaukippen im Nordraum Lausitz mit künstlichen neuronalen Netzen

**Andreas Barth (*), Enrico Kallmeier (*),
Robert Böhnke (**), Beate Lucke (**)**

(*) Beak Consultants GmbH, (**) Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungs-gesellschaft mbH

ZUSAMMENFASSUNG:

Mittels künstlichen neuronalen Netzen wurden die in den rekultivierten Tagebaukippen im Nordraum Lausitz (Tagebaue Schlabendorf und Seese) auftretenden Geländedeformationen infolge Bodenverflüssigung für die Jahre 2009 - 2013 als Zeitreihe modelliert.

Das Modell ist in der Lage, grob die zeitliche Entwicklung und exakt die räumliche Lage des in den Kippen auftretenden Gefährdungspotenzials nachzuvollziehen und als Funktion des sich ändernden Grundwasserspiegels und der sich ändernden Oberflächenmorphologie in die Zukunft zu prognostizieren. Das Modell zeigt dynamisch das Entstehen neuer Risikoflächen in bisher scheinbar stabilen Bereichen des Untersuchungsgebietes.

Die Korrektheit des Modells wurde mittels verschiedener Tests geprüft sowie anhand einer Prognoserechnung für das Jahr 2014 und des Vergleichs mit den real in 2014/2015 gegangenen Ereignissen nachgewiesen.

Folgende Gefährdungsfaktoren wurden ermittelt:

Destabilisierend wirken eine möglichst einförmige Lithologie folgender Zusammensetzung: 31 % Feinsand, 34 % Mittelsand, 31 % Grobsand, 3 % Schluff, < 1 % Kies, < 1 % Kalk, < 1 % Ton, < 1 % Kohle, kf-Werte zwischen 10-4 und 10-4,5 m/s, ein Grundwasserflurabstand bei 3,45 m (Medianwert), möglichst hohe Gradienten der nicht lithologisch kontrollierten Parameter: Tagebauoberfläche, Grundwasseroberfläche, Grundwasserflurabstand und Mächtigkeit der gesättigten Kippe.

Stabilisierend wirken vor allem eine möglichst große Heterogenität der Lithologie auf kleinem Raum (möglichst hohe Gradienten der lithologisch kontrollierten Parameter (z.B. Kiesgehalt, Sandgehalt, Tongehalt, Kohlegehalt)), ein möglichst geringer Sandanteil, möglichst hohe Anteile an Kies, Schluff, Ton, Kalk, bzw. Kohle, ein möglichst großer Grundwasserflurabstand sowie möglichst geringe Gradienten der nicht lithologisch kontrollierten Parameter: Tagebauoberfläche, Grundwasseroberfläche, Grundwasserflurabstand, Mächtigkeit der gesättigten Kippe sowie wechselnde kf-Werte 10-7 bzw. >10-2 m/s.

Für die Bearbeitung wurden ausschließlich die bei der LMBV vorhandenen bzw. laufend flächendeckend erhobenen Daten genutzt: Lage des Grundwasserspiegels, Relief der Tagebauoberfläche, Liegendes der Kippe, geologische Daten der Vorfeldbohrungen.

Das Modell kann als dynamisches Instrument zum Risikomanagement vor bzw. während der Sanierungsmaßnahmen genutzt werden. Mittels der Variation der prozesskontrollierenden Parameter können die geotechnischen Auswirkungen verschiedener Sanierungsszenarien (z.B. Gestaltung der Tagebauoberfläche, Schüttung der Kippen, Grundwasseranstieg) auf die Stabilität der Kippen prognostiziert werden.

ABSTRACT:

Geotechnical events (terrain deformation due to soil liquefaction) in lignite mining waste rock piles of the northern Lausitz area (opencast pits Schlabendorf and Seese), have been modeled as time series for the years 2009 – 2013 by using artificial neural networks.

The model has clearly recognized the influences of various lithological and non-lithological controlled parameters on the occurrence of geotechnical events, and these have been quantified and weighted in terms of their importance. The model is able to predict the temporal evolution and the exact spatial location of the events occurring in the dumps as a function of changing groundwater levels and surface morphology. The model shows dynamically the emergence of new risk areas in hitherto seemingly stable areas.

The correctness of the model was confirmed by means of various tests and its predictive success was demonstrated through forecasting of events for the years 2014 and 2015 and their comparison with the observed events of those years.

The following main risk factors were identified:

Important destabilizing factors are a monotonous lithology with the following composition: 31% fine sand, 34% medium sand, 31% coarse sand, 3% silt, <1% gravel, <1% lime, <1% clay, <1% coal, kf-values between 10^{-4} and $10^{-4.5}$ m/s, a surface to groundwater distance of 3.45 meters (median value), high gradients of non-lithological controlled parameters: waste dump surface, groundwater level, depth to groundwater and thickness of saturated dump.

2. Important stabilizing factors are a high heterogeneity of lithology (high gradients of the lithological controlled parameters: e.g. gravel content, sand content, clay content, carbon content), a low proportion of sand in the dump composition, high proportions of gravel, silt, clay, lime, or coal, a high depth to groundwater, low gradients of non-lithological controlled parameters: open pit surface, groundwater surface, depth to groundwater, thickness of saturated dump, strongly changing kf values between 10^{-7} and 10^{-2} m/s.

The model can be used as a dynamic tool for risk management before and during the rehabilitation of lignite waste dumps, and for constructing stable waste dumps. By means of varying the model parameters (e.g. design of the dump surface, composition of dumped rocks, rising groundwater) the geotechnical effects of dump design and remediation scenarios can be predicted.

1 Untersuchungsgebiet, Ausgangssituation und Historie

Gegenstand der Untersuchungen sind die stark von Geländedeformationen infolge Setzungsfließen beeinflussten Innenkippen der ehemaligen Braunkohlentagebaue Schlabendorf und Seese (Abb. 1). Diese Tagebaue wurden im Jahr 1990 stillgelegt und deren Innenkippen mit einer Gesamtfläche von ca. 100 km² rekultiviert und für eine multifunktionale Nachnutzung vorbereitet. Seit ca. dem Jahr 2009 treten in diesen Innenkippen scheinbar unkontrolliert erhebliche geotechnische Instabilitäten auf, welche deren wirtschaftliche Nachnutzung nahezu unmöglich machen (LMBV 2012).

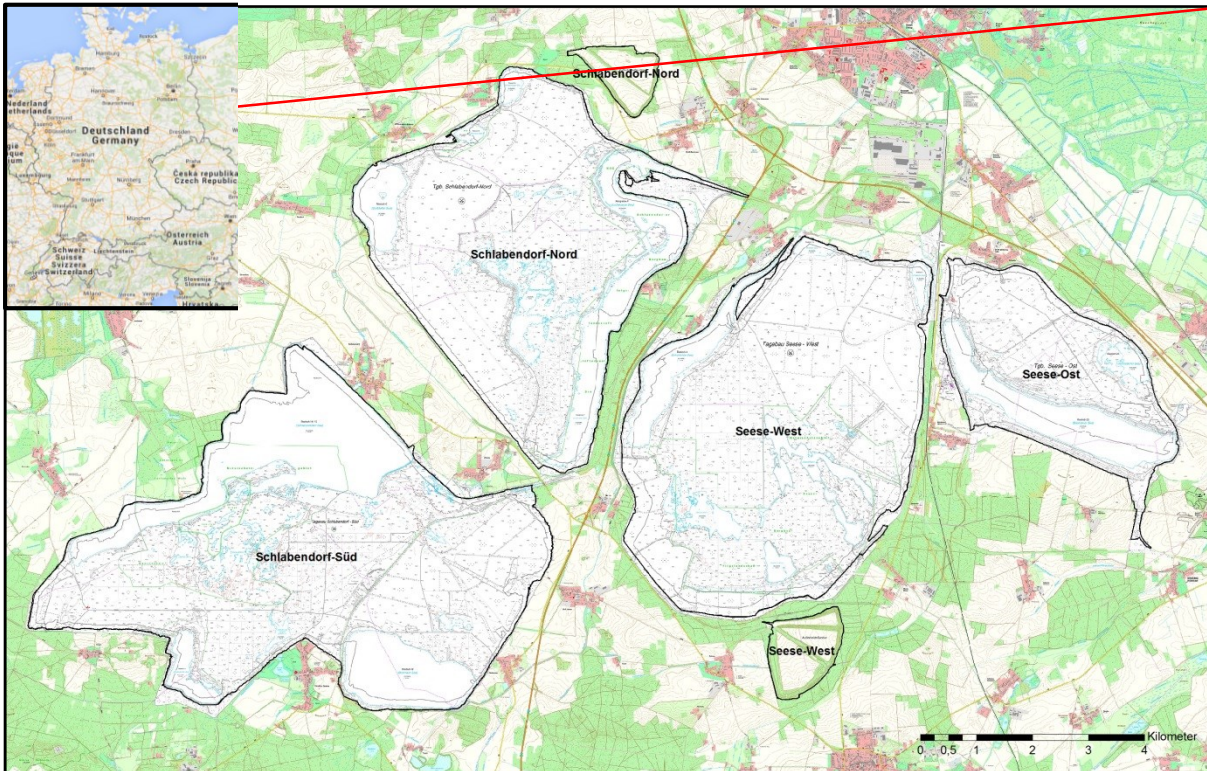


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes

Die LMBV untersucht seit Jahren gemeinsam mit verschiedenen Partnern aus Forschung und Wirtschaft intensiv die Ursachen und Wirkmechanismen der Instabilitäten (Kudla 2012 und 2014) mit dem Ziel diese zeitlich und räumlich zu prognostizieren und Strategien für eine angemessene und sichere Nachnutzung zu entwickeln.

Der generelle Zusammenhang der geotechnischen Probleme mit dem Wiederanstieg des Grundwassers ist unumstrittener Konsens (Ergebnisse F+E-Projekte des geotechnischen Beirates der LMBV mbH). Umfangreiche Arbeiten führten zur Entwicklung verschiedener Theorien bzgl. der konkreten Wirkmechanismen und der Ableitung von geotechnischen Gefährdungsfaktoren (Dennhardt und Förster 2012). Die praktische Anwendbarkeit dieser Ergebnisse scheiterte jedoch bisher sowohl am Fehlen der entsprechenden flächenhaft erforderlichen Daten, an den Kosten der notwendigen Untersuchungen und nicht zuletzt auch an dem Fakt, dass Teile der Kippen aufgrund der Gefahrensituation nur eingeschränkt zugänglich sind.

In diesem Umfeld wurde im Jahr 2013 das Forschungsvorhaben „Integriertes Kippensicherheits- und Bewertungssystem (IKSB)“ aufgelegt mit dem Ziel auf empirischem Weg, mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze, Zusammenhänge und Wirkprinzipien zu erkennen (Kallmeier et al. 2014;

Roscher et al. 2014). Erklärtes Ziel war die Ableitung eines Modells, welches das geotechnische Verhalten der Kippen in Abhängigkeit von den wesentlichen sich zeitlich verändernden Parametern Grundwasseroberfläche und Geländeoberfläche und den weiteren flächenhaft verfügbaren Daten erklärt und geeignet ist, zeitliche und räumliche Vorhersagen der Instabilitäten zu treffen (Kallmeier et al. 2014; Roscher et al. 2014).

2 Datengrundlagen

Für die Bearbeitung wurden ausschließlich flächenhaft verfügbare Daten ausgewählt, welche entweder routinemäßig von der LMBV erhoben werden bzw. anderweitig frei verfügbar sind:

- Lage und Zeitpunkt der geotechnischen Ereignisse (Airborne Laserscanning/Luftbilder, anderweitiges Monitoring der LMBV)
- Morphologie der Geländeoberfläche (Lidar-Überwachung der Kippen)
- Morphologie der Kippenbasis (Daten der Tagebauvermessung)
- Lage der Grundwasseroberfläche (hydrogeologische Modelle der LMBV)
- Daten der geologischen Erkundung der Braunkohlelagerstätten

Aus diesen Datengrundlagen wurden mittels verschiedener Verfahren jeweils für die Jahresscheiben 2009 – 2013 folgende für die Modellierung genutzten 16 Datenebenen sowie deren Gradienten und Richtungen der Gradienten abgeleitet:

- Umringe und zeitliche Einordnung der Primärereignisse
- nicht lithologisch kontrollierte Parameter:
 - Grundwasseroberfläche
 - Tagebauoberfläche (Geländemodell)
 - Grundwasserflurabstand
 - Basis der Kippe
 - Gesättigte Kippe
- lithologisch kontrollierte Parameter:
 - Anteil Ton
 - Anteil Schluff
 - Anteil Feinsand
 - Anteil Mittelsand
 - Anteil Grobsand
 - Anteil Kies
 - Anteil Kohle
 - Anteil Kalk
 - kf-Wert
 - d10
 - d60

Damit stehen für die Modellierung insgesamt 64 unabhängige Parameter (je Parameter 1x Absolutwert, 1x Gradient, 1x Richtung des Gradienten in N-S Achse und 1 x Richtung des Gradienten in E-W Achse) jeweils für die Jahresscheiben 2009 – 2013 zur Verfügung.

Für die Berechnung der lithologisch kontrollierten Parameter wurden die Daten der geologischen Erkundung (siehe Abb. 2) sowie Kenntnisse der Gewinnungs- und Kippenschütttechnologie mittels Abraumförderbrücke genutzt. Die Lithologie der Kippe wurde als Mittelwert des Deckgebirges der

Kohle jeweils entsprechend gegenläufig zur Abbaurichtung um 300 m rückversetzt berechnet (Röscher et al. 2014). Für die Bearbeitung wurde eine räumliche Auflösung von 25 m gewählt. Alle Daten wurden auf das entsprechende Grid umgerechnet. Je Jahresscheibe wurden ca. 130.000 Rasterzellen ausgewertet. Beispiele für die auf 25 m gerasterten Ausgangsdaten sind in Abb. 3 dargestellt.

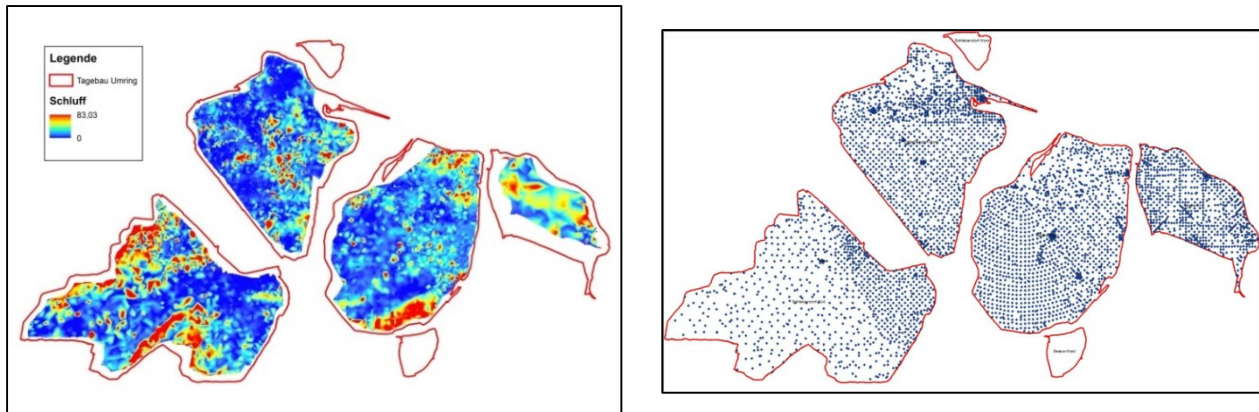


Abb. 2: Lage der Erkundungsbohrungen (links), abgeleiteter Datenlayer „Schluffgehalt“ (rechts)

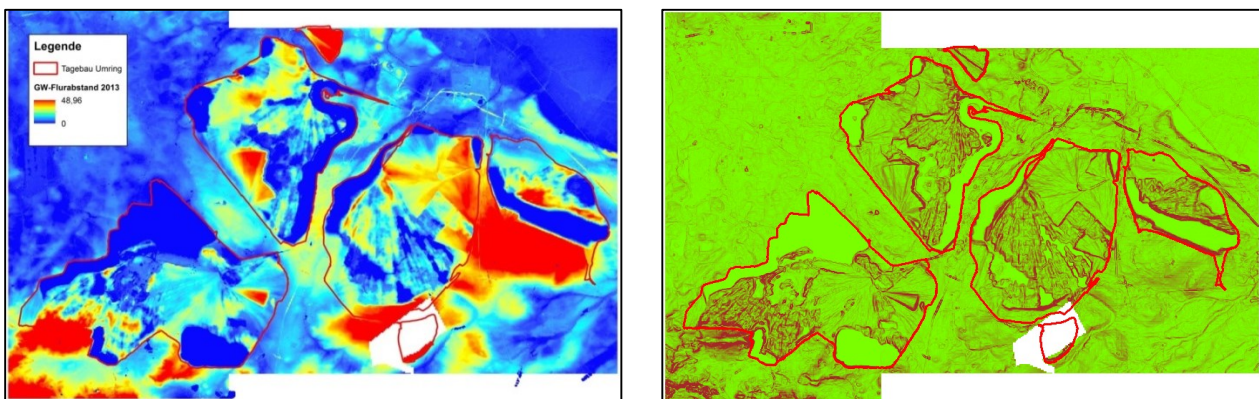


Abb. 3: Berechneter Grundwasserflurabstand für das Jahr 2013 (links) und zugehöriger Gradient (rechts)

3 Methodik

Für die Modellierung wurde das Verfahren der künstlichen neuronalen Netze, implementiert in der advangeo® Prediction Software eingesetzt (Noack et al. 2012 und 2014). Das empirische lernfähige Verfahren erkennt selbständig Zusammenhänge zwischen dem Auftreten (ja/nein) der abhängigen Variable (in diesem Fall: Eintritt des geotechnischen Ereignisses) und den potenziell ereigniskontrollierenden Parametern und erzeugt als Rechenergebnis Prognosekarten, welche das Potenzial für den Eintritt der abhängigen Variable anzeigen. Der prinzipielle Bearbeitungsfluss der Modellierung ist in Abb. 4 dargestellt.

Für die Beurteilung der Modellqualität stehen folgende Parameter zur Verfügung (Noack et al. 2014):

- Der Netzfehler (sollte $< 0,2$ sein)
- Die Statistik der Treffer
- Die Gewichte der Eingangsparameter

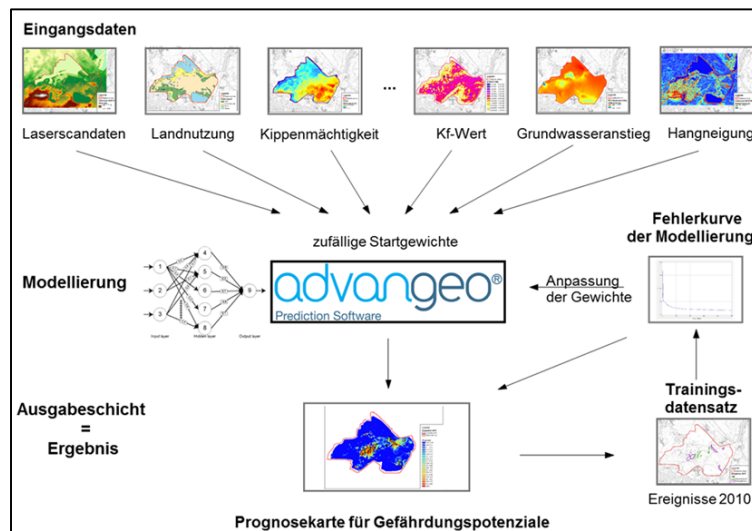


Abb. 4: Bearbeitungsfluss der Modellierung

4 Separate Prognoseszenarien für einzelne Jahresscheiben

Die separate Modellierung der geotechnischen Ereignisse innerhalb der Jahresscheiben 2009 – 2013 mit den im Vorgängerprojekt (Modell 6) als sensitiv eingestuft Parameter: Grundwasseroberfläche-Absolutwert, Grundwasseroberfläche-Gradient, Tagebauoberfläche-Gradient, Grundwasserflurabstand, Mächtigkeit der gesättigten Kippe, Mächtigkeit der Gesamtkippe, Gehalte von Ton, Schluff, Feinsand, Mittelsand, Grobsand, Kies, d_{10} und Kf-Wert war nicht erfolgreich (Abb. 5). Obwohl pro Jahresscheibe in sich schlüssige und plausible Ergebnisse erzielt werden und die jeweils aufgetretenen Ereignisse klar erkannt werden, sind die Ergebnisse zwischen den Jahresscheiben nicht vergleichbar. So treten z.B. in der Jahresscheibe 2010 in Schlabendorf-Nord und Seese-West keine Ereignisse auf, und das Modell sagt auch keine Ereignisse vorher. Ereignisse treten hier erst im Jahr 2011 auf und werden dort auch exakt modelliert.

Deutliche Unterschiede der Modelle der verschiedenen Jahresscheiben werden bei der Gewichtung der Eingangsparameter sichtbar (Abb. 5). Das neuronale Netz erkennt in den verschiedenen Jahresscheiben eine unterschiedliche Bedeutung der potentiell kontrollierenden Parameter und dementsprechend unterschiedlich fallen auch die Modellierungsergebnisse aus. Eine Extrapolation der Ergebnisse zwischen den Jahresscheiben ist nicht möglich.

Ein weiterer Fortschritt bei der Modellierung mit Berücksichtigung der zeitlichen Komponente erfordert eine Gesamtbetrachtung aller Ereignisse über alle Jahresscheiben und die Einbeziehung aller potentiell kontrollierenden Parameter.

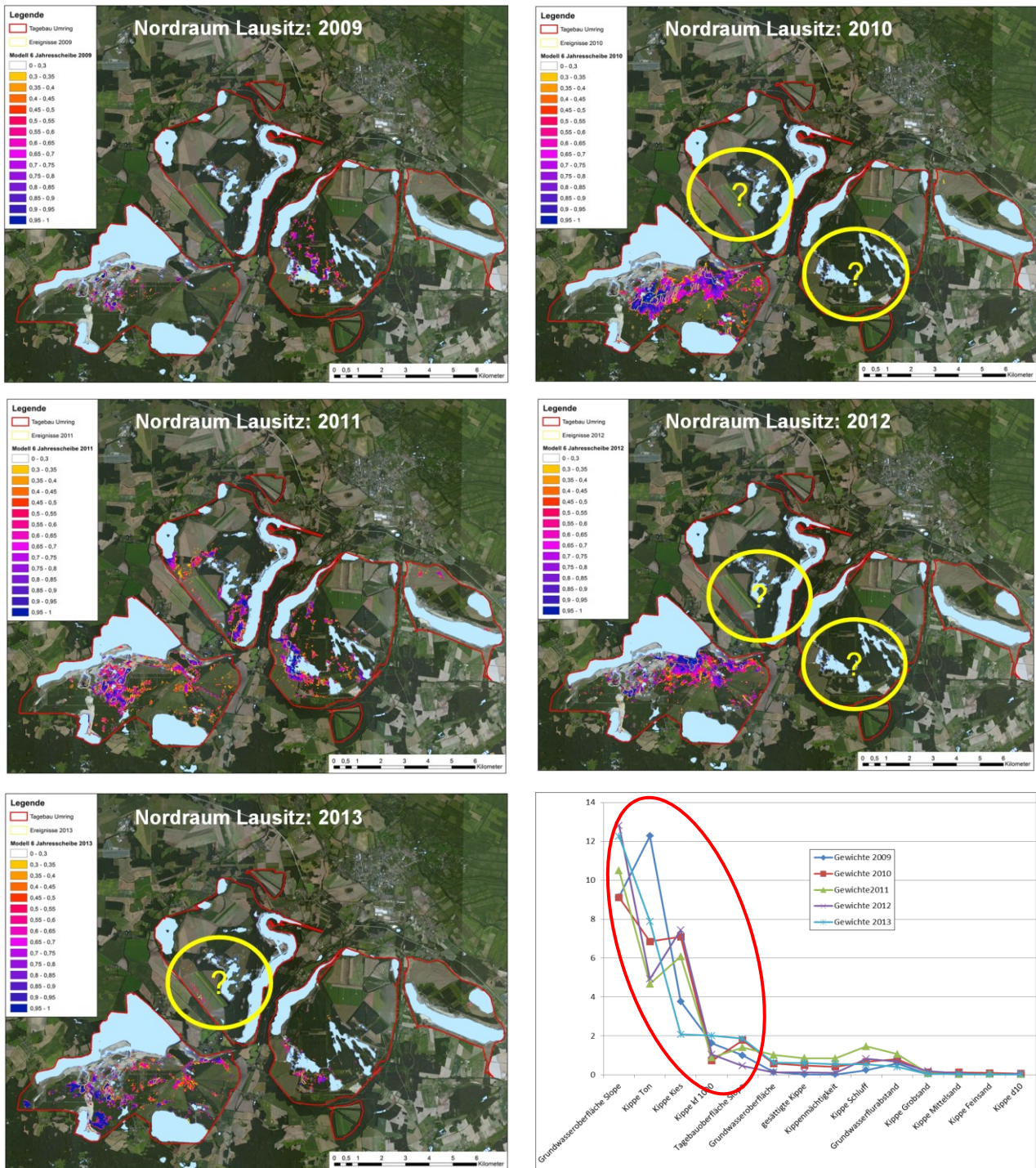


Abb. 5: Gefährdungspotenzial der Jahresscheiben 2009 – 2013 (Modell 6) und Gewichte der Modellparameter

5 Zeitreihenanalysen

5.1 Übersicht

Mittels der Zeitreihenanalyse wurde der gesamte verfügbare Datensatz nach Gesetzmäßigkeiten auf Zusammenhänge zwischen dem Auftreten geotechnischer Ereignisse und den potenziell kontrollierenden Faktoren untersucht. Dazu wurden alle Daten (5 Jahresscheiben 64 Einzelparameter) zu einem Datensatz vereint. Damit standen für die Auswertung ca. 650000 Rasterzellen mit je 64 Parametern zur Verfügung. Die Analyse der Zeitreihen erfolgte stufenweise:

- Einbeziehung der Absolutwerte der nicht lithologisch kontrollierten Parameter
- Einbeziehung der Absolutwerte der lithologisch kontrollierten Parameter
- Einbeziehung der lithologisch und nicht lithologisch kontrollierte Parameter und deren Ableitungen slope und Aspekt

5.2 Analyse der nicht lithologisch kontrollierten Parameter (Modell 16)

Die Modellierung der geotechnischen Ereignisse mit den fünf nicht lithologisch kontrollierten Parametern: Grundwasseroberfläche 2009 bis 2013, Grundwasserflurabstand 2009 – 2013, Tagebauoberfläche 2009 bis 2013 und Gesättigte Kippe liefert bereits zufriedenstellende Ergebnisse. Der Netzfehler liegt bei 0,115. Die Gewichte der Modellparameter (siehe Tab. 1) weisen die hervorragende Bedeutung des Grundwasserflurabstands, gefolgt von der Tagebauoberfläche und der Grundwasseroberfläche nach. Das Modell erkennt klar die besondere Bedeutung der Böschungen und eines bestimmten Grundwasserflurabstandes als Risikofaktoren (siehe z.B. Jahresscheibe 2009, Abb. 6).

Tab. 1: Gewichte der Modellparameter, Modell 16

Parameter	Gewicht
Grundwasserflurabstand 2009 bis 2013	3,37
Tagebauoberfläche 2009 bis 2013	3,31
Grundwasseroberfläche 2009 bis 2013	2,87
Tagebauliegendes	0,93
gesättigte Kippe	0,52

Ereignisse werden meist sehr gut erkannt. Ausnahmen sind in Abb. 6 gut erkennbar: so z.B. ein Ereignis im Zentralteil von Seese-West im Jahr 2009. Ganz offensichtlich spielen an den betreffenden Stellen Faktoren eine Rolle, welche in dem zur Modellierung eingesetzten Parametersatz nicht enthalten waren. Klar erkennbar ist die Verlagerung der Gefährdungspotenziale mit der Veränderung des Grundwasserstandes. So steigt z.B. das Gefährdungspotenzial im SE-Teil des Tagebaus Seese-West von 2009 zu 2013 stark an. Die Ergebnisse sind allerdings insgesamt noch recht unscharf, es werden vergleichsweise große Flächen als gefährdet ausgewiesen. Die Histogramme des Modells 16 (Abb. 7) zeigen eine recht gute Modellanpassung, auch wenn das Maximum der Trainingsdaten bereits in der Klasse 0,7 – 0,8 erreicht wird. Das Gesamtdatenkollektiv weist ein klares Maximum zwischen 0 und 0,1 auf.

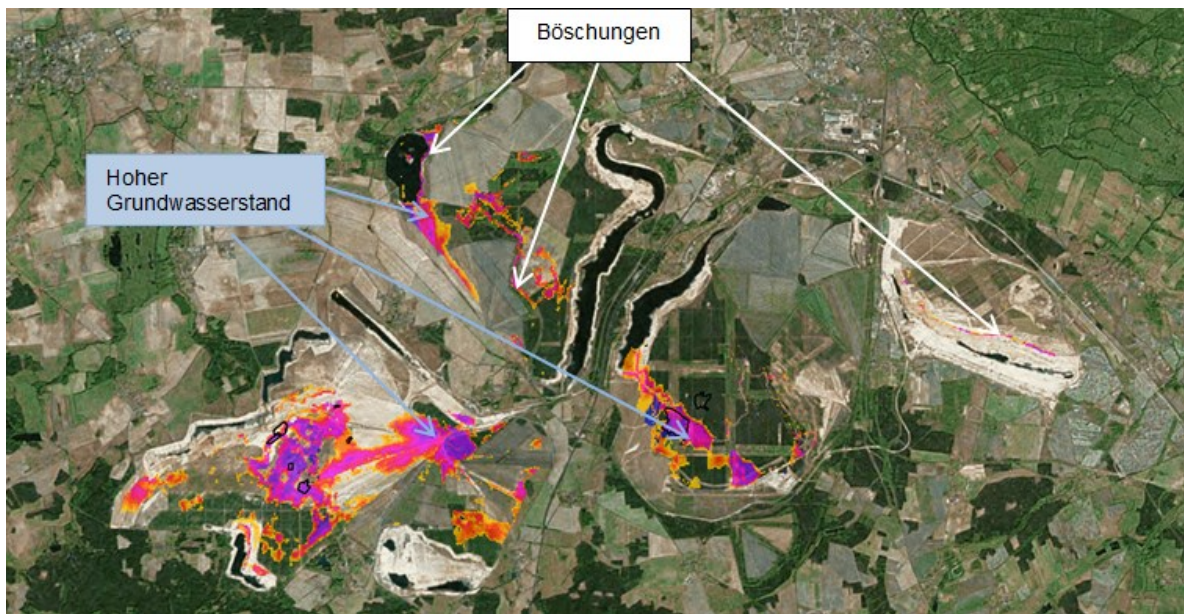


Abb. 6: Modell 16 für die Jahresscheibe 2009, Gefährdungspotenzial > 0,3

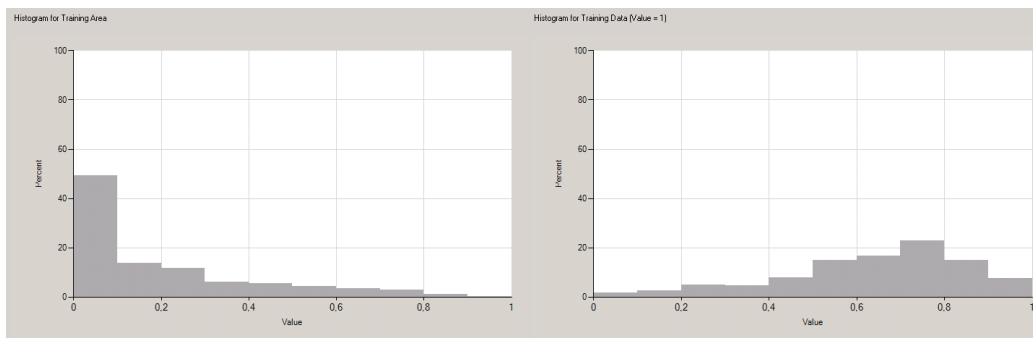


Abb. 7: Histogramme der Modellanpassung, Modell 16

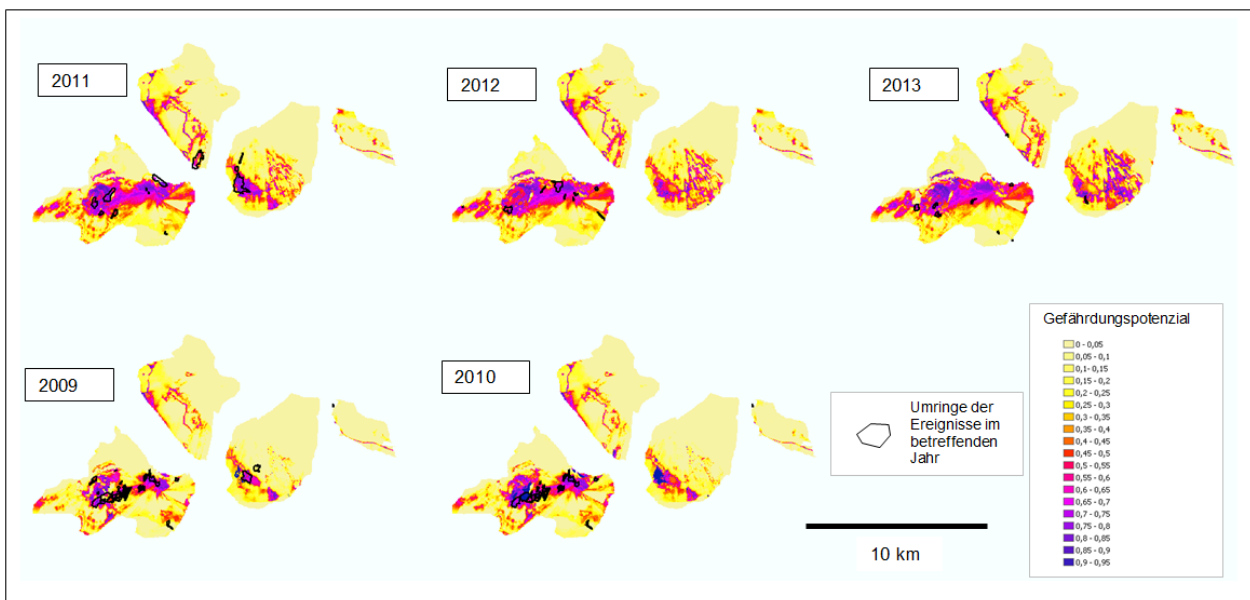


Abb. 8: Berechnungsergebnisse Modell 16 (Zeitreihe 2009 - 2013, nicht lithologisch kontrollierte Parameter), Gefährdungspotenzial $\geq 0,3$

5.3 Einfluss der lithologisch kontrollierten Parameter (Modell 17)

Die Nutzung der geotechnischen Ereignisse mit den elf lithologisch kontrollierten Parametern: Anteil Ton, Anteil Schluff, Anteil Feinsand, Anteil Mittelsand, Anteil Grobsand, Anteil Kies, Anteil Kohle, Anteil Kalk, kf-Wert, d10, d60 gestattet lediglich eine zeitlich statische Modellierung.

Der Netzfehler liegt bei 0,16 aus und ist deutlich größer, als der des Modells 16. Die Gewichte der Modellparameter (siehe Tab. 2) weisen die erhebliche Bedeutung von Ton, Schluff, Kohle, Kalk und Kies für die räumliche Lage der geotechnischen Ereignisse nach. Böschungen und Gebiete mit einem geringen Grundwasserflurabstand können als Risikofaktoren in diesem Modellansatz nicht erkannt werden (siehe z.B. Jahresscheibe 2009, Abb. 10). Vielmehr werden Gebiete mit einem sehr hohen Sandgehalt als Risikofaktor ausgewiesen. Ereignisse werden in allen Jahresscheiben gut erkannt (Abb. 11), insgesamt gesehen sind die prognostizierten Gefährdungsbereiche jedoch zu groß und unscharf.

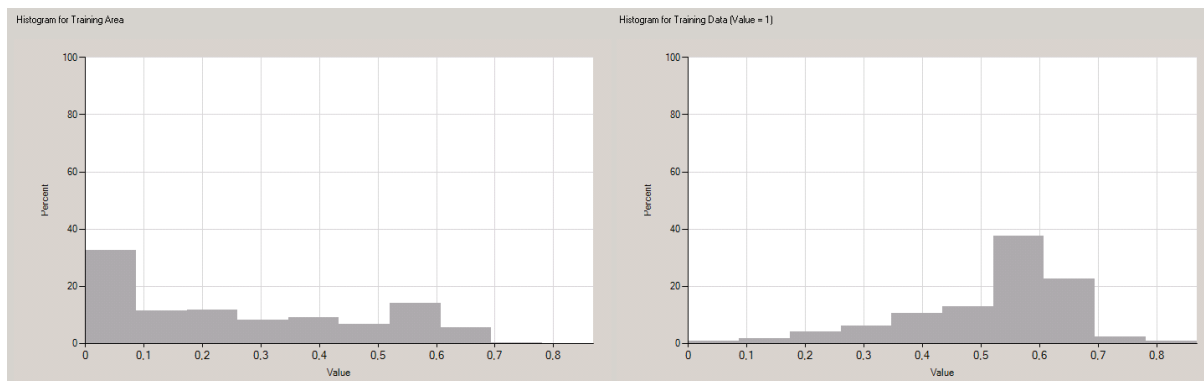


Abb. 9: Histogramme der Berechnungsergebnisse, Modell 17

Die Histogramme des Modells 17 (Abb. 9) zeigen nur eine mittelmäßige Modellanpassung: die Klasse 0,8 – 1 der Trainingsdaten ist kaum belegt und das Gesamtdatenkollektiv ist mehr oder weniger gleichmäßig verteilt über eine Breite von 0 – 0,7. Damit wird insgesamt belegt, dass das Modell 17 nicht die Qualität des Modells 16 erreicht. Die für die Berechnung im Modell 17 genutzten Parameter sind weniger signifikant als die Parameter des Modells 16.

Tab. 2: Gewichte der Modellparameter, Modell 17

Parameter	Gewicht
Kippe Kohle	6,24
Kippe Ton	5,32
Kippe Kalk	5,08
Kippe Kies	4,19
Kippe kf 1000	1,2
Kippe Schluff	0,61
Kippe Feinsand	0,11
Kippe Grobsand	0,09
Kippe Mittelsand	0,06
Kippe d10	0,05
Kippe d60	0,04

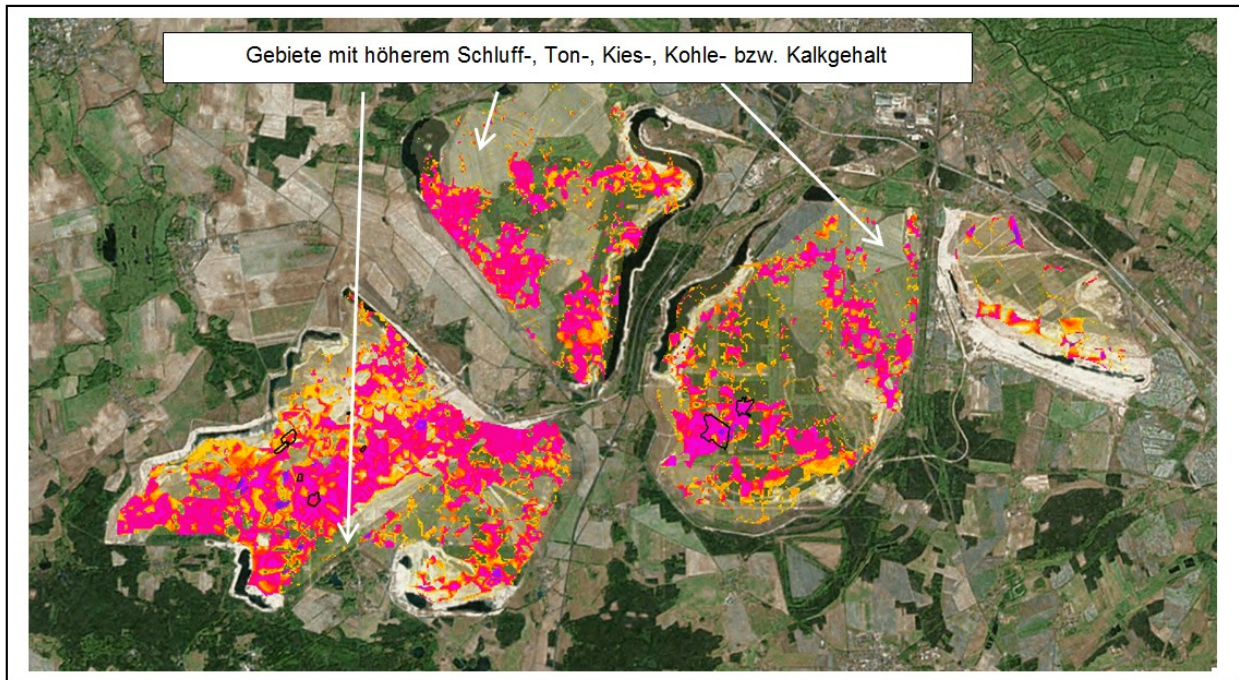


Abb. 10: Modell 17 für die Jahresscheibe 2009, Gefährdungspotenzial $\geq 0,3$

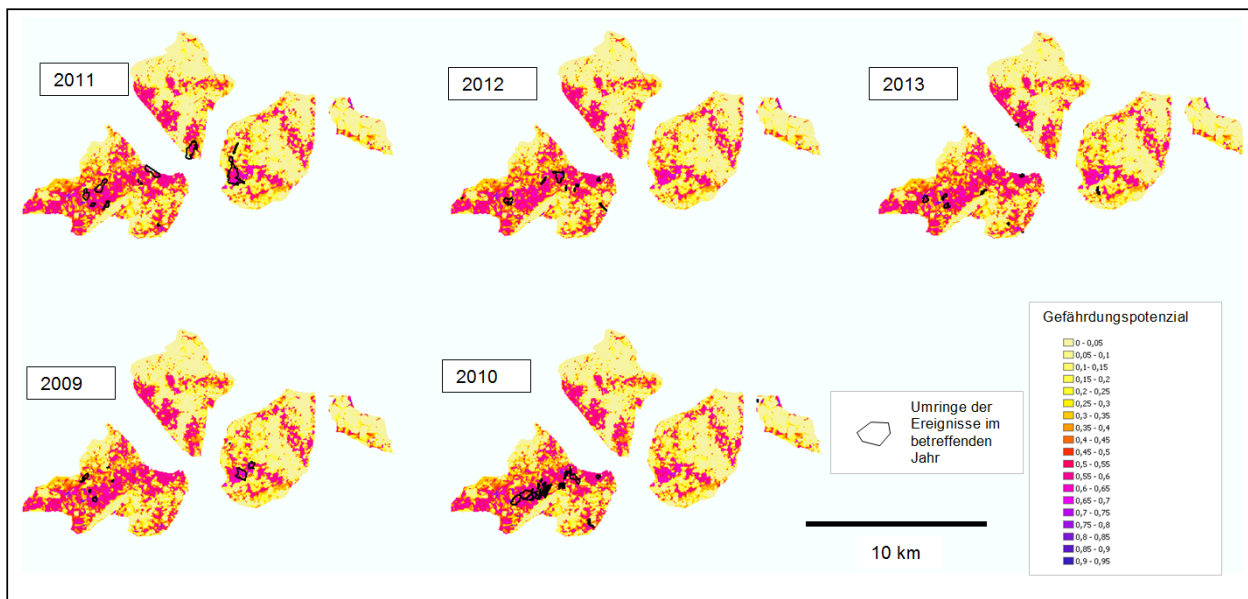


Abb. 11: Berechnungsergebnisse Modell 17 (Zeitreihe 2009 - 2013, lithologisch kontrollierte Parameter), Gefährdungspotenzial $\geq 0,3$

5.4 Gemeinsame Betrachtung lithologisch kontrollierter und nicht lithologisch kontrollierter Parameter inkl. Gradienten und Aspekten (Modell 30)

Die Modellierung der geotechnischen Ereignisse mit allen verfügbaren 64 Parametern erzeugt ein sehr stabiles und exaktes Modell. Der Modellfehler liegt bei 0,047. Die Gewichte der Modellparameter (Abb. 12) weisen auf die große Bedeutung der Gradienten der zeitlich dynamischen Parameter Grundwasseroberfläche, Grundwasserflurabstand und Tagebauoberfläche gefolgt von den Gradienten der lithologisch kontrollierten Parameter hin.

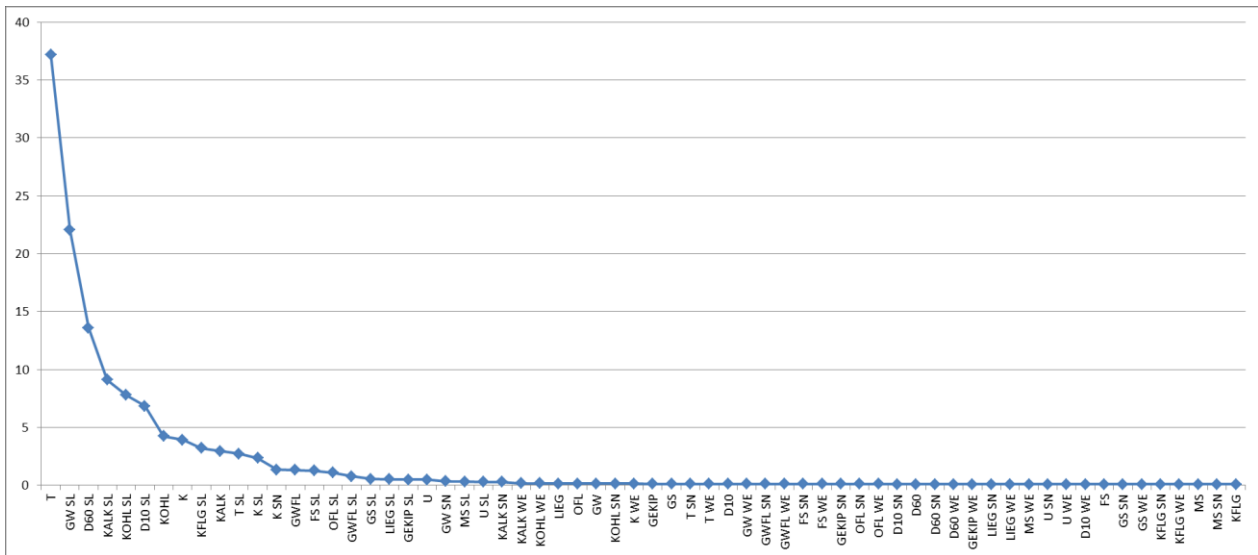


Abb. 12: Gewichte der Modellparameter (Modell 30) (SL-Gradient)

Ein Vergleich der Gebiete mit hohem Gefährdungspotenzial mit der räumlichen Lage von Gebieten mit erhöhten Kalk-, Ton-, Kohle- bzw. Kiesgehalten zeigt, dass diese Parameter ganz offensichtlich kippenstabilisierend wirken. Ereignisse werden in allen Jahresscheiben sehr gut erkannt (Abb. 15), insgesamt gesehen sind die prognostizierten Gefährdungsbereiche deutlich schärfer und weniger verwaschen als die Ergebnisse der Modelle 16 und 17.

Die zeitliche Verlagerung der Gefährdungspotenziale mit der Veränderung des Grundwasserstandes ist gut erkennbar. So steigt z.B. das Gefährdungspotenzial im Zentralteil des Tagebaus Schlabendorf-Süd von 2009 zu 2013 stark an. Im Bereich des Tagebaus Seese-West steigt das Risikopotenzial in Flächen die bereits in 2009 im Ansatz erkennbar waren.

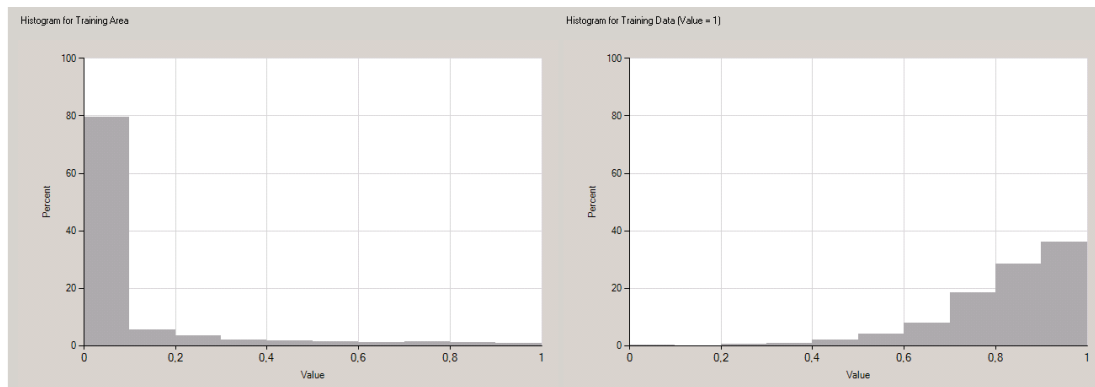


Abb. 13: Histogramme der Berechnungsergebnisse, Modell 30

Die Histogramme (Abb. 13) zeigen eine ausgezeichnete Modellanpassung: die Klasse 0,9 – 1 weist für die Trainingsdaten ein klares Maximum aus. Das gesamt Datenkollektiv weist ebenfalls ein klares Minimum im Bereich 0 – 0,1 aus. Insgesamt sind die Verteilungskurven sehr ausgewogen.

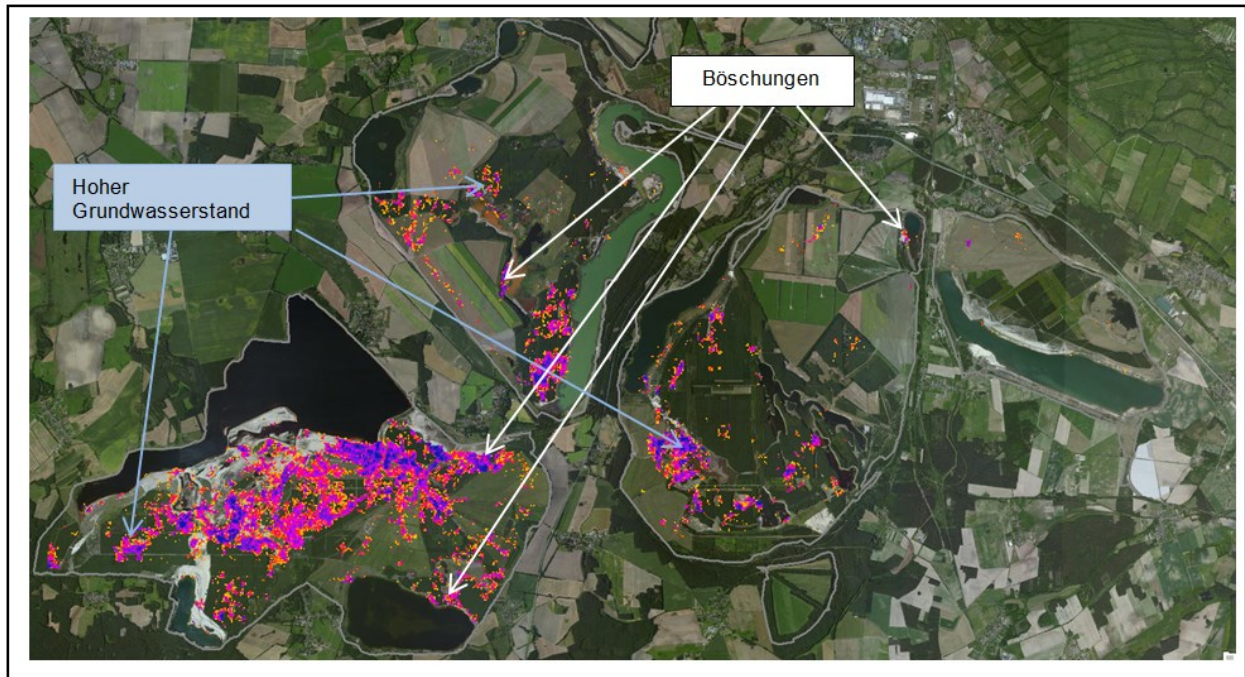


Abb. 14: Modell 30 für die Jahresscheibe 2009, Gefährdungspotenzial $\geq 0,3$

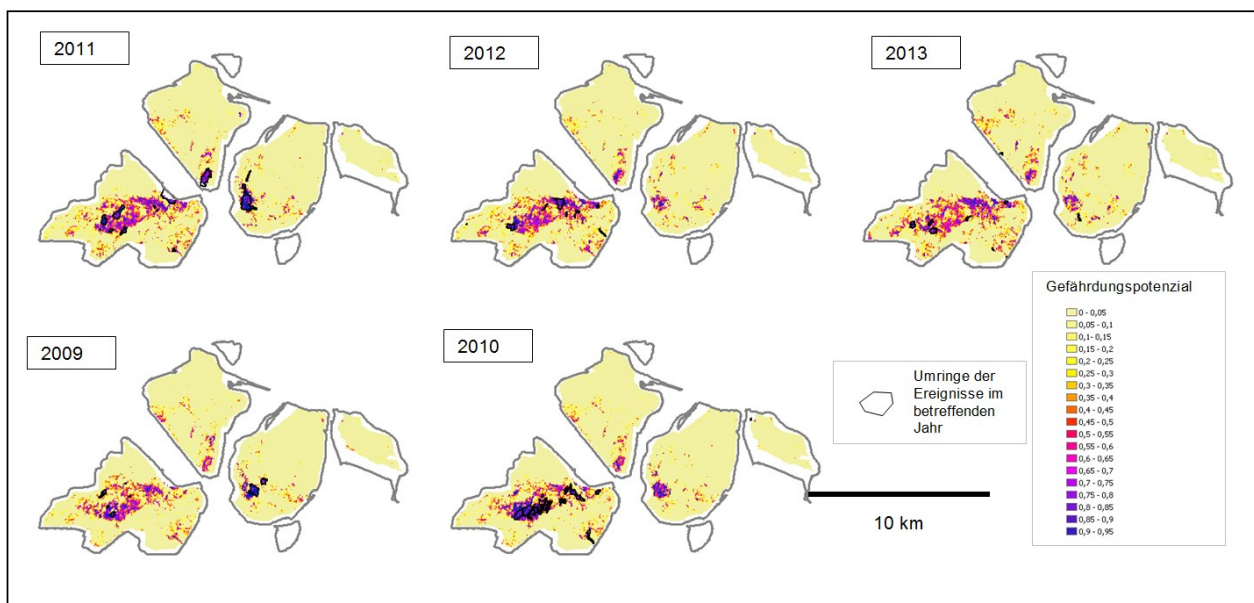


Abb. 15: Berechnungsergebnisse Modell 30 (Zeitreihe 2009 - 2013), Gefährdungspotenzial $\geq 0,3$

6 Gefährdungsfaktoren

6.1 Die Gewichte der Parameter

Der Vergleich der Absolutwerte und der Gradienten der für die Modellierung verwendeten Parameter (Abb. 16) unterstreicht die enorme Bedeutung der Gradienten für die Parameter Grundwasseroberfläche, D10, D60, Ton, Feinsand, Kies, Kalk, Kohle und Kf-Wert. Die Gewichte der Gradienten-

ten übersteigen meist die Gewichte der Absolutwerte der Parameter (Ausnahmen: Tongehalt, Kiesgehalt).

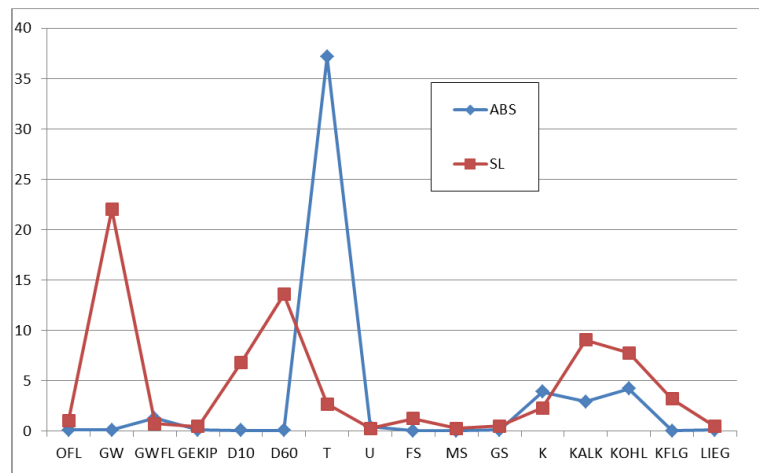


Abb. 16: Vergleich der Gewichte der Absolutwerte (ABS) und der Gradienten (SL) der Modelleingangsparameter

Die kippenstabilisierend wirkenden Parameter Ton, Kies, Kohle, Kalk zeichnen sich durch hohe Werte der Gewichte sowohl der Absolutwerte als auch der Gradienten aus. Eine herausragende Bedeutung kommt offensichtlich dem Tongehalt zu. Hier tritt die Bedeutung des Gradienten deutlich hinter die Bedeutung des Absolutwerts zurück. Der Gradient der Grundwasseroberfläche wird als entscheidender Faktor klar erkannt, während die absolute Höhe des Grundwasserspiegels keine Bedeutung hat (siehe dazu auch die Histogramme der Parameterwerte). Beim Grundwasserflurabstand sind sowohl der absolute Wert als auch der Gradient von erheblicher Bedeutung. Die Gewichte der Gradienten der Sandfraktionen treten hinter den Gewichten der Absolutwerte zurück. Die Auswertung der Histogramme (Kapitel 6.2) zeigt, dass eine möglichst gleichmäßige Zusammensetzung der Kippe mit hohen Sandgehalten und geringen Gradienten der lithologischen Parameter entscheidend für die Instabilität der Kippe ist. Selbst geringe Beimengungen von Kies, Ton, Kohle und Kalk reduzieren das Gefährdungspotenzial erheblich. Eine Kippe mit stabilisierend wirkender lithologischer Zusammensetzung (d.h. möglichst hohe Gehalte der Komponenten Ton, Kies, Kohle und Kalk) ist selbst bei sehr ungünstigen Grundwasserflurabständen stabil.

Die Bedeutung der abgeleiteten lithologisch kontrollierten Parameter D10, D60 und Kf-Wert folgt der Tendenz der Einzelparameter: Der Gradient ist deutlich wichtiger als der Absolutwert.

6.2 Quantifizierung der Gefährdungsfaktoren

Der Einfluss ausgewählter Eingangsparameter auf die Stabilität/Instabilität der Kippen wird anhand der folgenden Datenkollektive untersucht:

- A - „Hohes Gefährdungspotenzial“: Parameterwerte aller Pixel mit einem Gefährdungspotenzial $>0,9$: 6175 Datensätze
- B – „Geringes Gefährdungspotenzial“: Parameterwerte aller Pixel mit einem Gefährdungspotenzial $<0,1$: 483114 Datensätze

Wesentliche Maßzahlen für 32 Einflussfaktoren sind in Tab. 3, Abb. 17 und Abb. 18 dargestellt.

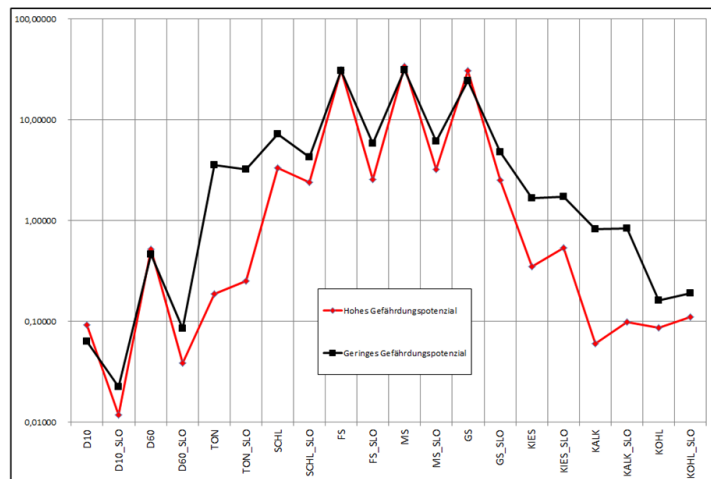


Abb. 17: Arithmetische Mittelwerte der lithologisch kontrollierten Parameter der Datenkollektive A - „Hohes Gefährdungspotenzial“ und B – „Geringes Gefährdungspotenzial“

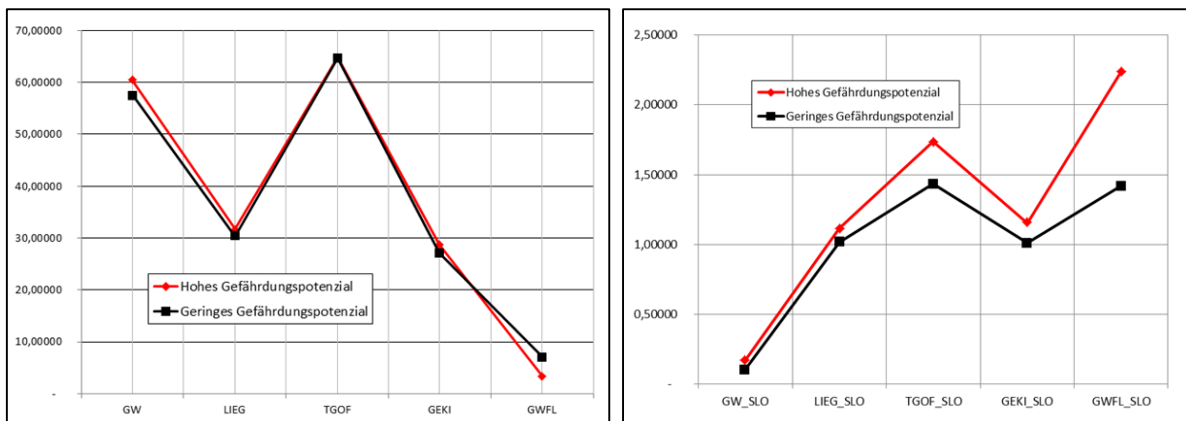


Abb. 18: Arithmetischen Mittelwerte (links) und Gradienten (rechts) der absoluten Werte der nicht lithologisch kontrollierten Parameter der Datenkollektive A - „Hohes Gefährdungspotenzial“ und B – „Geringes Gefährdungspotenzial“

Die herausragende Bedeutung des Grundwassers für die Stabilität der Kippenkörper wird aus der statistischen Analyse der Daten zum Grundwasser (Abb. 19) und zum Grundwasserflurabstand (Abb. 20) deutlich.

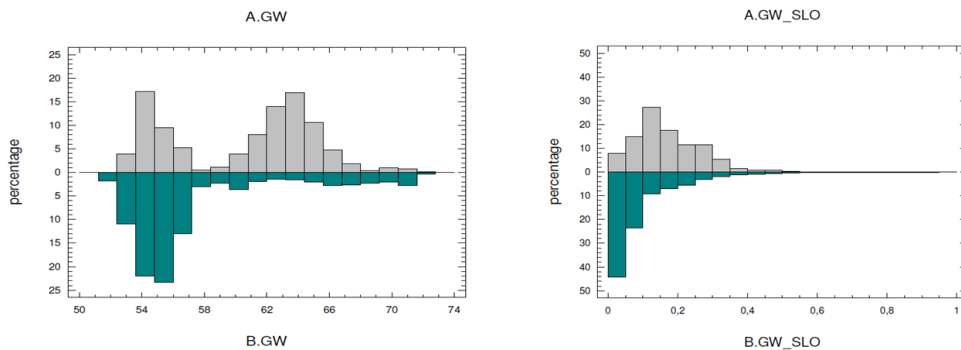


Abb. 19: Höhe und Gradient (_SLO) der Grundwasseroberfläche: A – in Risikogebieten (Potenzial > 0,9), B – in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial (Potenzial < 0,1)

Tab. 3: Arithmetische Mittelwerte ausgewählter Parameter für Kippen mit hohem und geringem Gefährdungspotenzial (Gefährdungsfaktoren)

Parameter (Kürzel)	Parameter	Kippe mit hohem Gefährdungspotenzial	Kippe mit geringem Gefährdungspotenzial
Lithologie			
FS	Feinsand	31	31
MS	Mittelsand	34	31
GS	Grobsand	31	25
Summe Sand		96	87
TON	Ton	0,19	3,57
SCHL	Schluff	3,36	7,21
KIES	Kies	0,35	1,68
KALK	Kalk	0,06	0,82
KOHL	Kohle	0,09	0,16
Summe Beimengungen		4	13
Gradienten der Lithologie			
Sand			
FS_SLO	Gradient des Feinsandgehalts	2,55	5,79
MS_SLO	Gradient des Mittelsandgehalts	3,22	6,17
GS_SLO	Gradient des Grobsandgehalts	2,54	4,82
Beimengungen			
TON_SLO	Gradient des Tongehalts	0,25	3,22
SCHL_SLO	Gradient des Schluffgehalts	2,38	4,23
KIES_SLO	Gradient des Kiesgehalts	0,54	1,74
KALK_SLO	Gradient des Kalkgehalts	0,10	0,84
KOHL_SLO	Gradient des Kohlegehalts	0,11	0,19
Kennwerte der Lithologie			
D10	d60-Wert	0,09	0,06
D10_SLO	Gradient des d60-Wertes	0,01	0,02
D60	d60-Wert	0,52	0,46
D60_SLO	Gradient des d60-Wertes	0,04	0,08
Kf-Wert			
KFLO	Logarithmus des Kf-Wertes	- 4,23	- 4,84
KFLO_SLO	Gradient des Logarithmus des Kf-Wertes	0,18	0,53
Kennwerte nicht lithologisch kontrollierter Parameter - absolute Werte			
GW	Grundwasserroberfläche	Ohne Bedeutung	
LIEG	Liegendes der Kippe		
TGOF	Erdoberfläche		
GEKI	Mächtigkeit der gesättigten Kippe	28,69	27,17
GWFL	Grundwasserflurabstand	3,45	7,17
Gradienten der nicht lithologisch kontrollierter Parameter			
GW_SLO	Gradient der Grundwasserroberfläche	0,17	0,10
LIEG_SLO	Gradient des Liegenden der Kippe	1,12	1,02
TGOF_SLO	Gradient der Erdoberfläche	1,74	1,43
GEKI_SLO	Gradient der Mächtigkeit der gesättigten K	1,15	1,01
GWFL_SLO	Gradient des Grundwasserflurabstands	2,23	1,42

Die absolute Höhe des Grundwasserspiegels hat keinen Einfluss auf das Gefährdungspotenzial. Geringere Gradienten des Grundwasserspiegels verringern das Gefährdungspotenzial und umgekehrt.

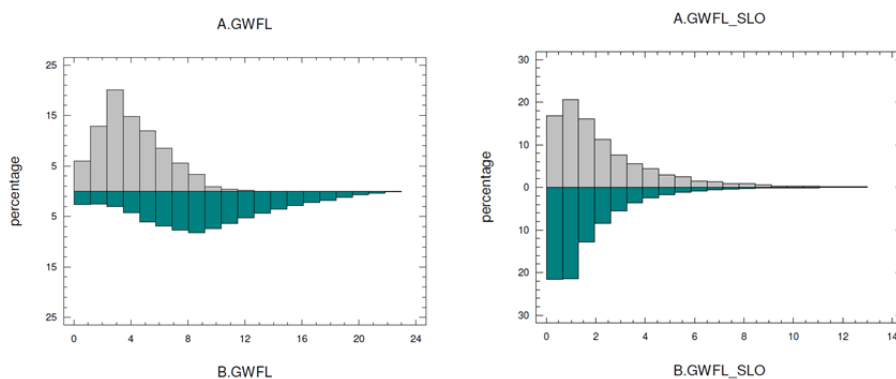


Abb. 20: Wert und Gradient (_SLO) des Grundwasserflurabstands: A – in Risikogebieten (Potenzial > 0,9), B – in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial (Potenzial < 0,1)

Das maximale Gefährdungspotenzial tritt bei einem Grundwasserflurabstand von 3,45 m auf, höhere Gradienten des Grundwasserflurabstands bewirken eine höheres Gefährdungspotenzial und umgekehrt.

Die absolute Höhe der Kippenoberfläche (Abb. 21) hat keinen Einfluss auf das Gefährdungspotenzial. Höhere Gradienten der Kippenoberfläche (Böschungen) erhöhen das Gefährdungspotenzial und umgekehrt.

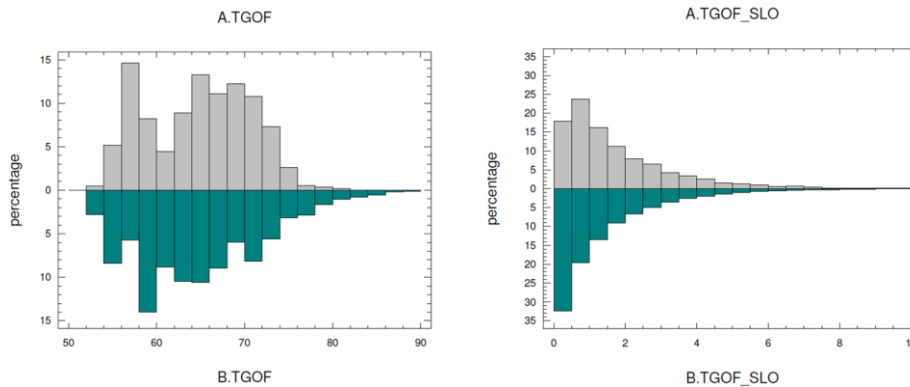


Abb. 21: Wert und Gradient (_SLO) der Kippenoberfläche: A – in Risikogebieten (Potenzial > 0,9), B – in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial (Potenzial < 0,1)

Gebiete mit hohem Gefährdungspotenzial weisen ein extremes Maximum des Parameters „kf-Wert“ bei $10^{-4,23}$ m/s auf (Abb. 22) und vergleichsweise niedrige Gradienten auf. Gebiete mit niedrigem Gefährdungspotenzial weisen eine sehr große Bandbreite des kf-Wertes auf, das Maximum liegt bei $10^{-4,1}$ m/s und in der Regel höhere Gradienten auf.

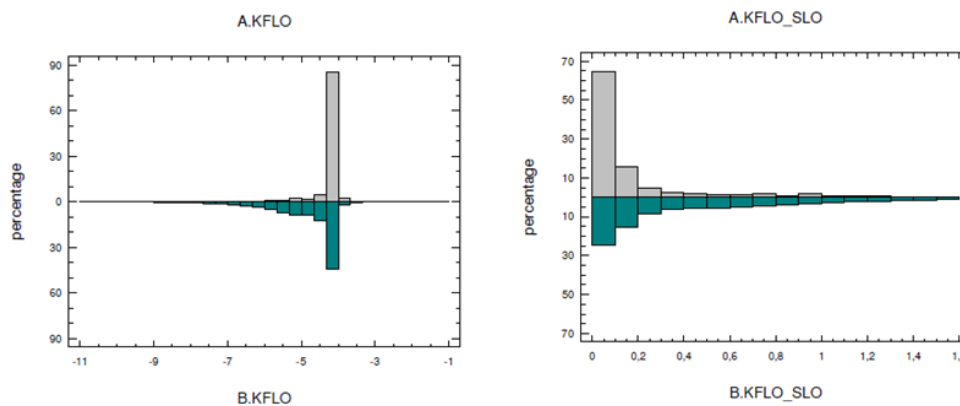


Abb. 22: Wert und Gradient (_SLO) des Parameters log „kf-Wert“: A – in Risikogebieten (Potenzial > 0,9), B – in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial (Potenzial < 0,1)

Gebiete mit hohem Gefährdungspotenzial weisen deutlich niedrigere Tongehalte auf als Gebiete mit niedrigem Gefährdungspotenzial. Die Verteilungen sind eingipfelig. Die Gradienten in gefährdeten Gebieten sind deutlich niedriger als in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial.

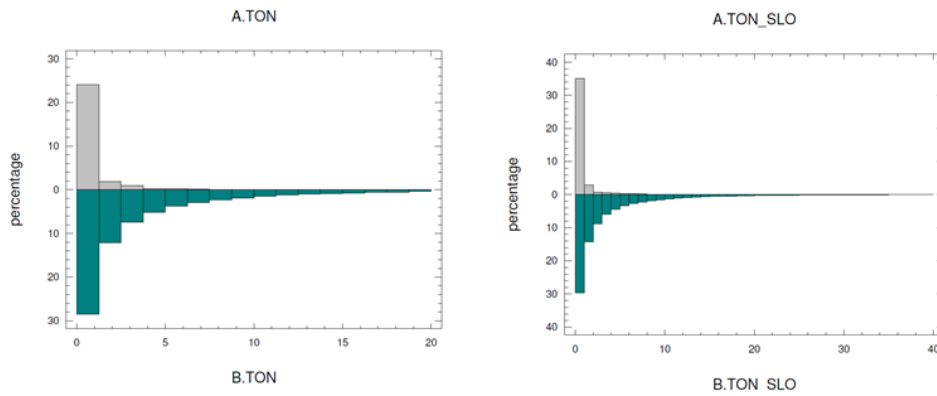


Abb. 23: Wert und Gradient ($_SLO$) des Parameters „Ton“: A – in Risikogebieten (Potenzial > 0,9), B – in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial (Potenzial < 0,1)

Gebiete mit hohem und geringem Gefährdungspotenzial überstreichen gleiche Wertebereiche des Parameters „Feinsand“. Gefährdungsbereiche weisen ein extremes Maximum bei 31,3 Vol.-% auf. Die Gradienten in Gebieten mit hohem Gefährdungspotenzial sind deutlich geringer als in Gebieten mit geringem Gefährdungspotenzial.

6.3 Zeitliche Entwicklung des Gefährdungspotenzials 2009 - 2013 und Prognose

Die in Abb. 24 dargestellte Zeitreihe 2009 – 2013 zeigt die Entwicklung des Gefährdungspotenzials vor dem Hintergrund der sich verändernden Grundwasseroberfläche. Deutlich zu erkennen ist der von Süden nach Norden ansteigende Grundwasserspiegel und die damit einhergehende Entstehung neuer Gefährdungspotenziale (z.B. in den farblich markierten Gebieten).

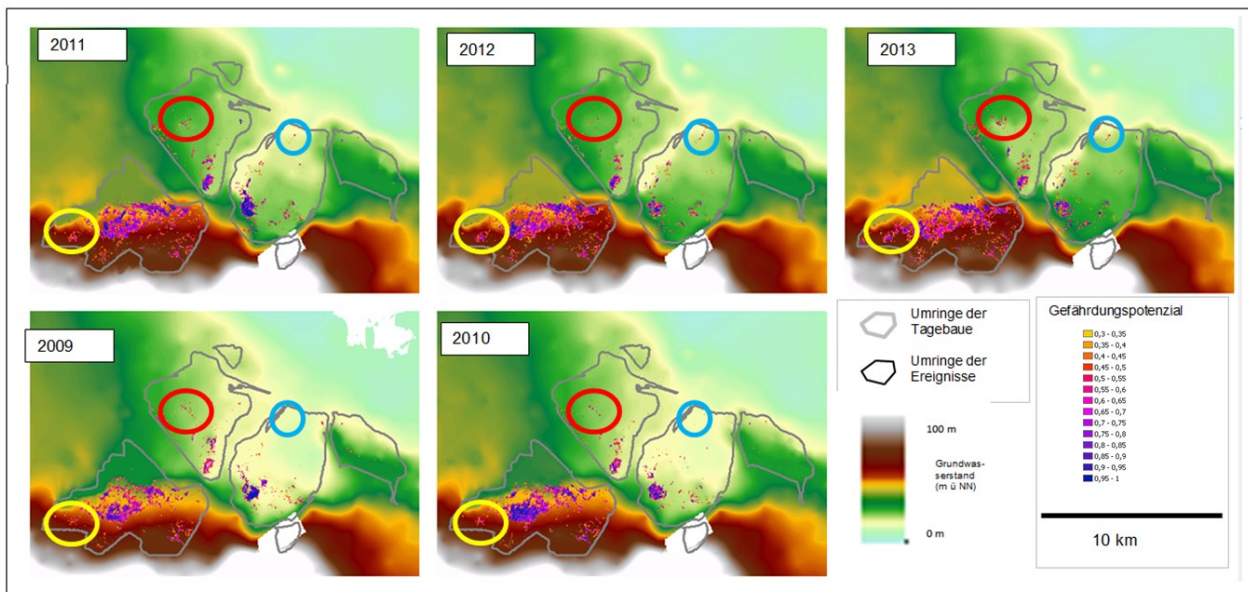


Abb. 24: Zeitreihe 2009 – 2013: Grundwasserstand und Gefährdungspotenzial

Die Bilanz des Gefährdungspotenzials der Jahresscheiben 2013 und 2009 (Abb. 25) visualisiert z.T. erhebliche räumliche Verschiebungen. Erhöhungen des Gefährdungspotenzials sind vor allem im Nordosten und Südwesten der Kippe Schlabendorf-Süd, im Norden der Kippe Seese-West und südwestlich des Schönfelder Sees und nördlich der Tornower Niederung zu verzeichnen. Verringer-

rungen des Gefährdungspotenzials können im Zentralteil der Kippe Schlabendorf-Süd und in einigen Gebieten der Kippe Seese-West und Schlabendorf-Nord beobachtet werden. Insgesamt gesehen steigt das Gefährdungspotenzial von 2009 zu 2013 stetig an.

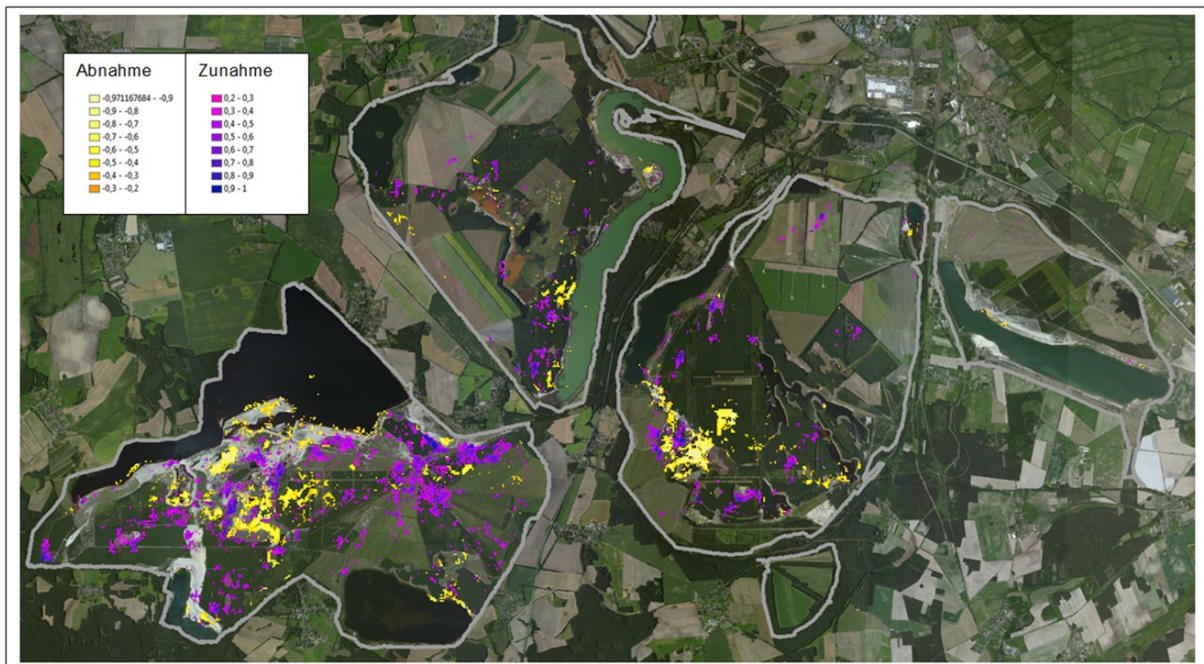


Abb. 25: Bilanz des Gefährdungspotenzials 2013 zu 2009

6.4 Prognose des Gefährdungspotenzials für 2014

Das Gefährdungspotenzial in 2014 wurde mit Hilfe des für die Zeitreihe 2009-2013 trainierten neuronalen Netzes und unter Berücksichtigung der Grundwasserdaten von 2014 berechnet (Abb. 26).

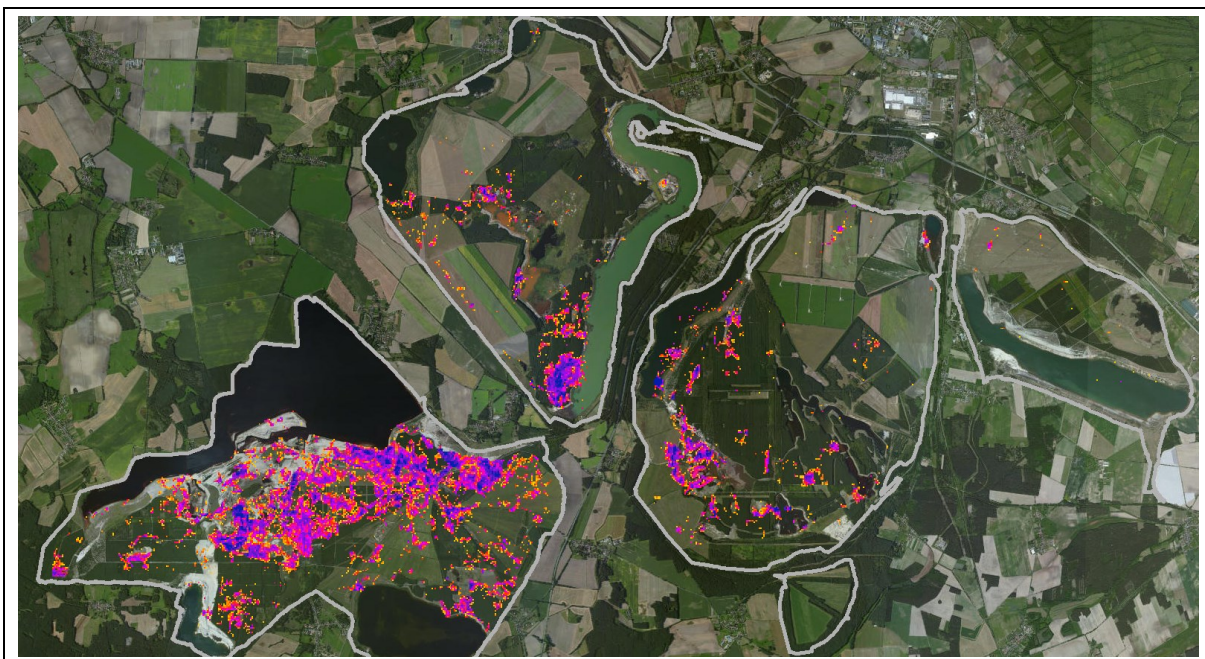


Abb. 26: Gefährdungspotenzial für 2014 berechnet mit dem für die Zeitreihe 2009 – 2013 trainierten neuronalen Netz (Modell 30)

Das Gefährdungspotenzial in 2014 wurde mit dem für die Zeitreihe 2009 – 2013 trainierten neuronalen Netz (Abb. 26) prognostiziert. Die Bilanz des Gefährdungspotenzials 2014 zu 2013 (Abb. 27) weist klar die Entwicklungstendenzen aus: In einigen Teilen des Untersuchungsgebietes steigt das Gefährdungspotenzial weiter an. Gebiete einer echten Reduzierung befinden sich vor allem im Zentral- und Westteil der Kippe Schlabendorf-Süd (Abb. 27).

Jeder weitere jahresbezogene Trainingsdatensatz wird zur Verbesserung des Modells und zur Erhöhung der Prognosegenauigkeit beitragen.

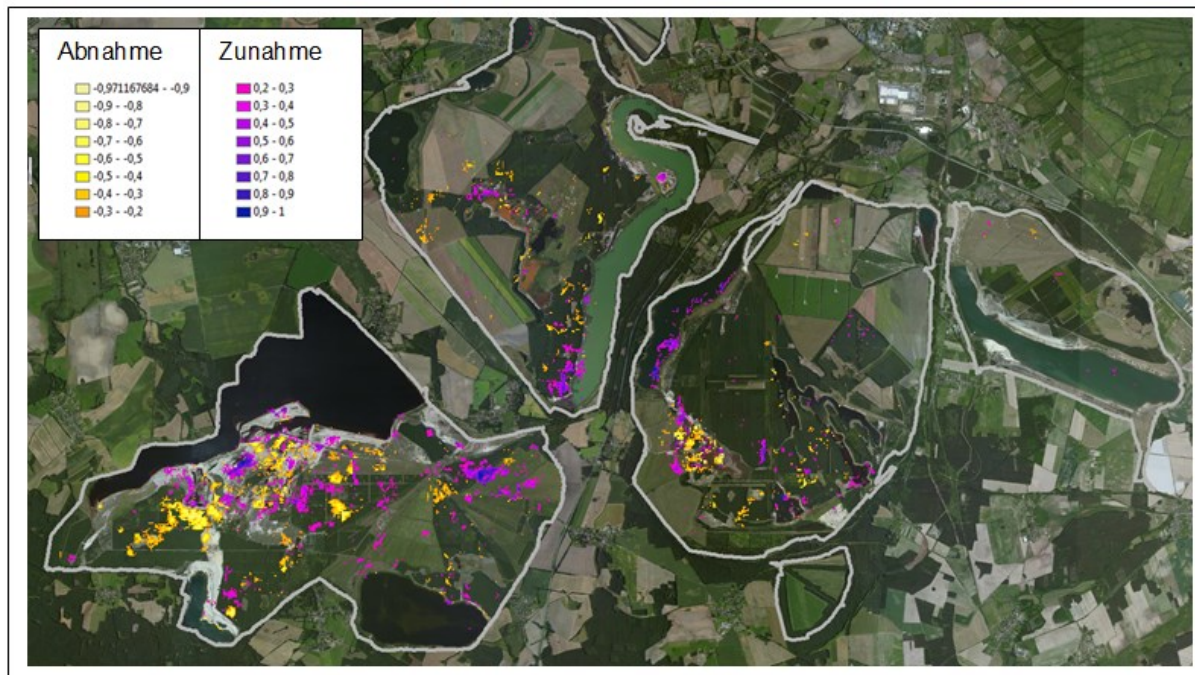


Abb. 27: Bilanz des Gefährdungspotenzials 2014 gegenüber 2013, Modell 30

6.5 Treffsicherheit der Prognosen

Die Treffsicherheit der Prognosen wird z.B. durch den Vergleich der räumlichen Lage des für 2013 und 2014 prognostizierten Gefährdungspotenzials mit den real in 2014/ 2015 gegangenen Ereignissen nachgewiesen.

Im Bereich des in Abb. 24 gelb markierten Gebietes entsteht von 2009 – 2013 in einem als saniert geltenden Gebiet der Kippe Schlabendorf-Süd schrittweise ein neues Gefährdungspotenzial. Hier wurde am 18.02.2015 eine Setzung registriert (Abb. 28).

Im Bereich des in Abb. 24 rot markierten Gebietes entsteht von 2009 – 2013 auf der Kippe Schlabendorf-Nord schrittweise ein neues Gefährdungspotenzial. Hier wurden offiziell bisher keine Ereignisse registriert. Das Satellitenbild zeigt in Teilbereichen sehr deutlich Abrisskanten und umgestürzte Bäume (Abb. 28).

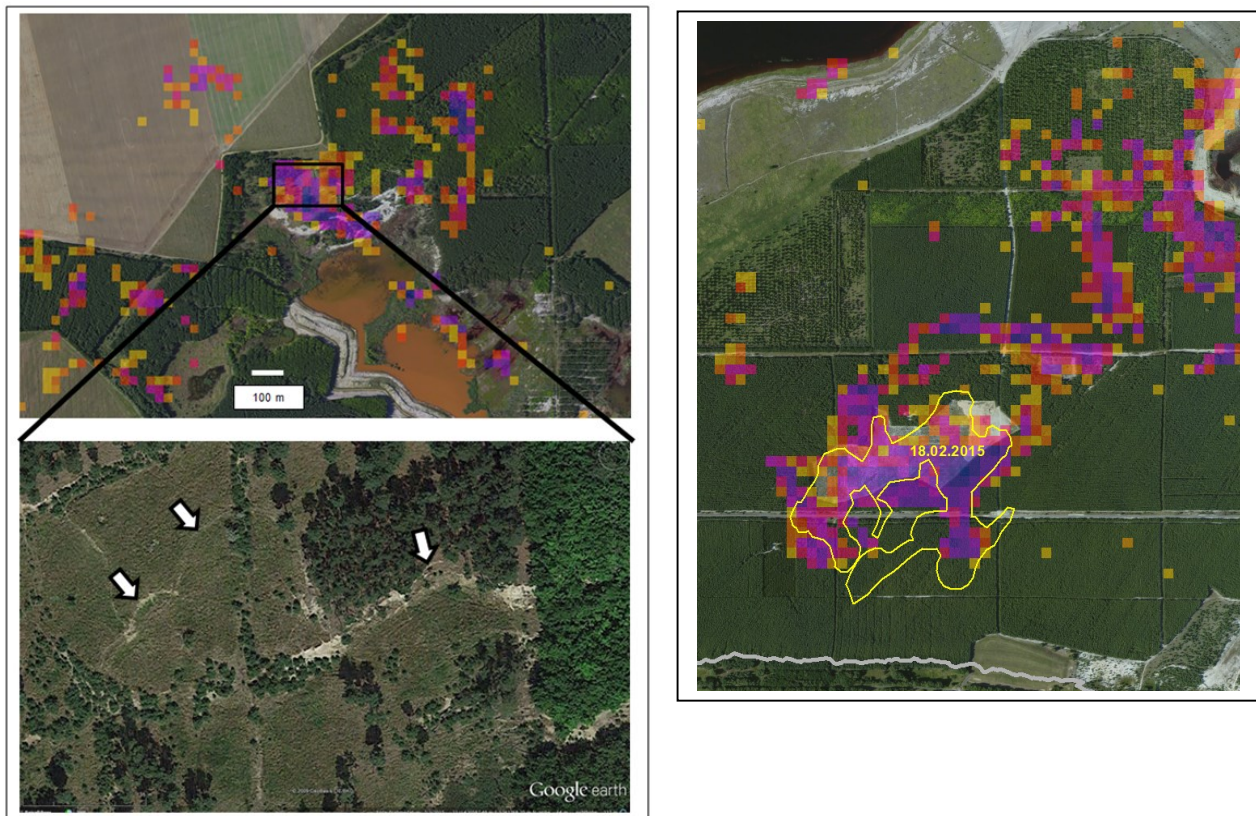


Abb. 28: Links: Gefährdungspotenzial 2013 und Abrisskanten am Nordrand der Tornower Niederung (roter Umring in Abb. 24), Rechts: Gefährdungspotenzial 2013 mit gegangenen Ereignis im Südwesten der Kippe Schlabendorf-Süd (gelber Umring in Abb. 24)

6.6 Gebiete mit erhöhtem Gefährdungspotenzial

Zur weiteren Nutzung der Prognoseergebnisse im Rahmen des Managements der Sanierungsaufgaben der LMBV wurden anhand der Daten von 2013 insgesamt 34 mehr oder weniger zusammenhängende Risikogebiete ausgehalten (Abb. 29) und näher hinsichtlich der derzeitigen Flächennutzung und der erwarteten Ereignistypen beschrieben. Die Gesamtfläche der Risikogebiete beträgt ca. 21,4 km². Darin enthalten sind:

- 8 Flächen mit erwarteten Rutschungen: Gesamtfläche: ca. 0,7 km²
- 13 Flächen mit erwarteten Senkungen: Gesamtfläche ca. 2,2 km²
- 13 Flächen mit erwarteten Senkungen und Rutschungen: Gesamtfläche ca. 18,5 km²

Bei einer Gesamtfläche der Kippen und Restlöcher von 94,8 km² beträgt der Flächenanteil der Risikogebiete ca. 23 %; bezogen auf die mit Daten parametrisierte Fläche von 75,83 km² (121328 Pixel à 625 m²) beträgt der Anteil der Risikogebiete ca. 28 %.

Die ausgehaltenen Risikogebiete beinhalten u.a.:

- Böschungen über Verdichtungstrassen
- Gebiete mit offensichtlichen Ereignissen (nach Satellitenbild), welche aber als solche bisher nicht ausgewiesen sind
- landwirtschaftliche Nutzfläche, z.T. auch mit Windkraftanlagen
- Forstgebiete
- Feuchtgebiete

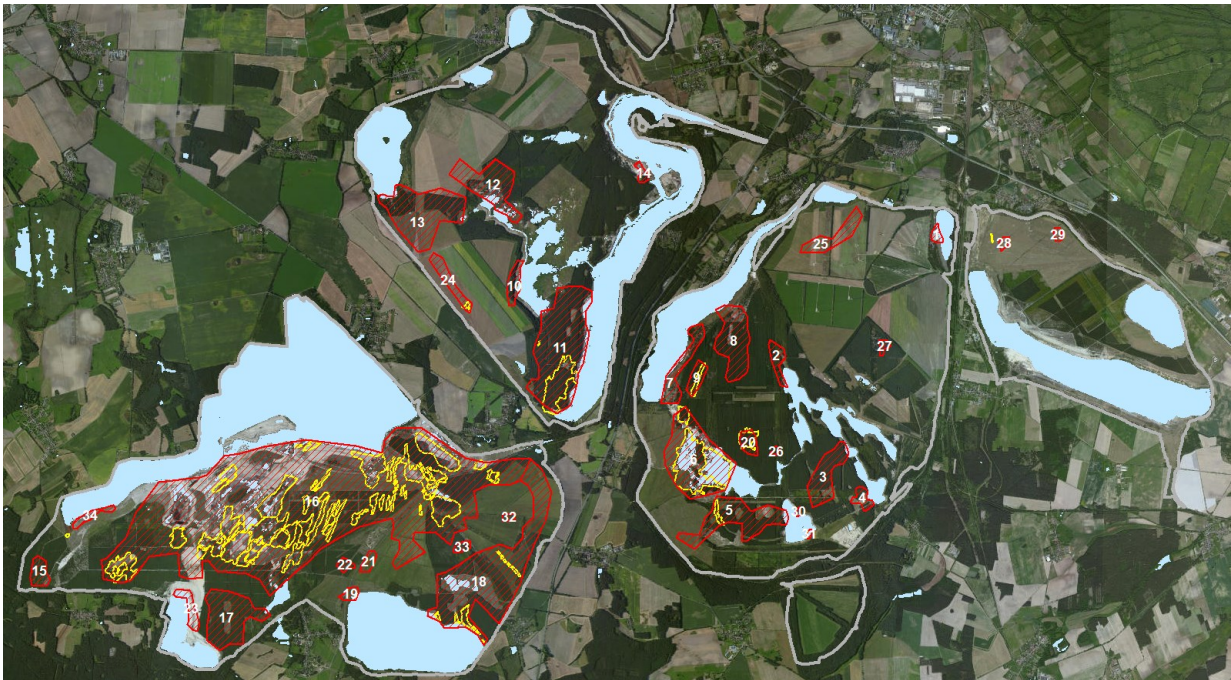


Abb. 29: Gefährdungsflächen und dokumentierte Ereignisse der Jahre 2009 – 2015

In Abb. 30 sind Risikoflächen und Verdichtungstrassen zusammenfassend dargestellt. In einigen Fällen werden Risikogebiete über Verdichtungstrassen ausgewiesen, so z.B.:

- Nr. 1: Böschung westlich des Redlitzer Sees
- Nr. 10: Böschung westlich der Tornower Niederung,
- Nr. 23: Nord- und Nordostböschung des Stiebsdorfer Sees
- Nr. 15: Böschung und Forstfläche am Südennde des Stoßdorfer Sees
- Nr. 34: Nordostböschung Bischdorfer See
- Nr. 7 und Nr. 8: Ostufer des Schönfelder Sees.

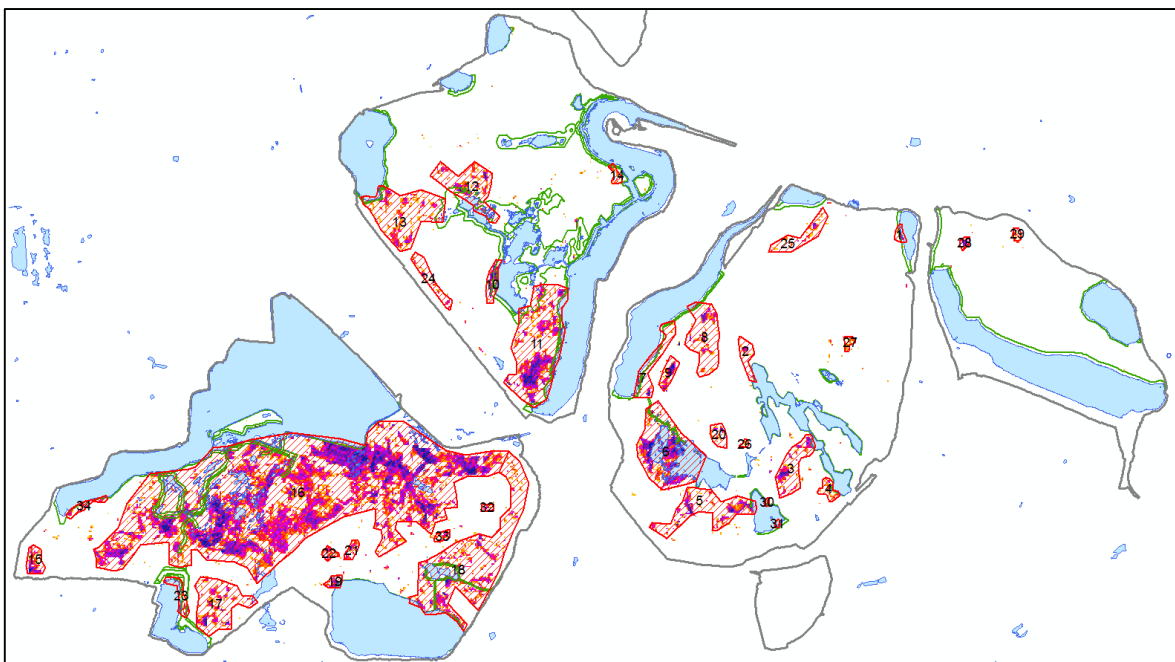


Abb. 30: Lage der Risikogebiete (Prognoserechnung der Jahresscheibe 2013) und realisierte Verdichtungsringe (grün) (Stand 22.09.2015)

„Gefährdete Böschungen“ wurden nach den Kriterien Neigungswinkel > 5 Grad und Gefährdungspotenzial $> 0,3$ gesondert ausgewiesen (Abb. 31) und beschrieben. Häufig sind an den betreffenden Stellen Rutschungsereignisse entweder bereits dokumentiert und/oder im Luftbild klar erkennbar. Die betreffenden Objekte befinden sich z.T. über Verdichtungstrassen.

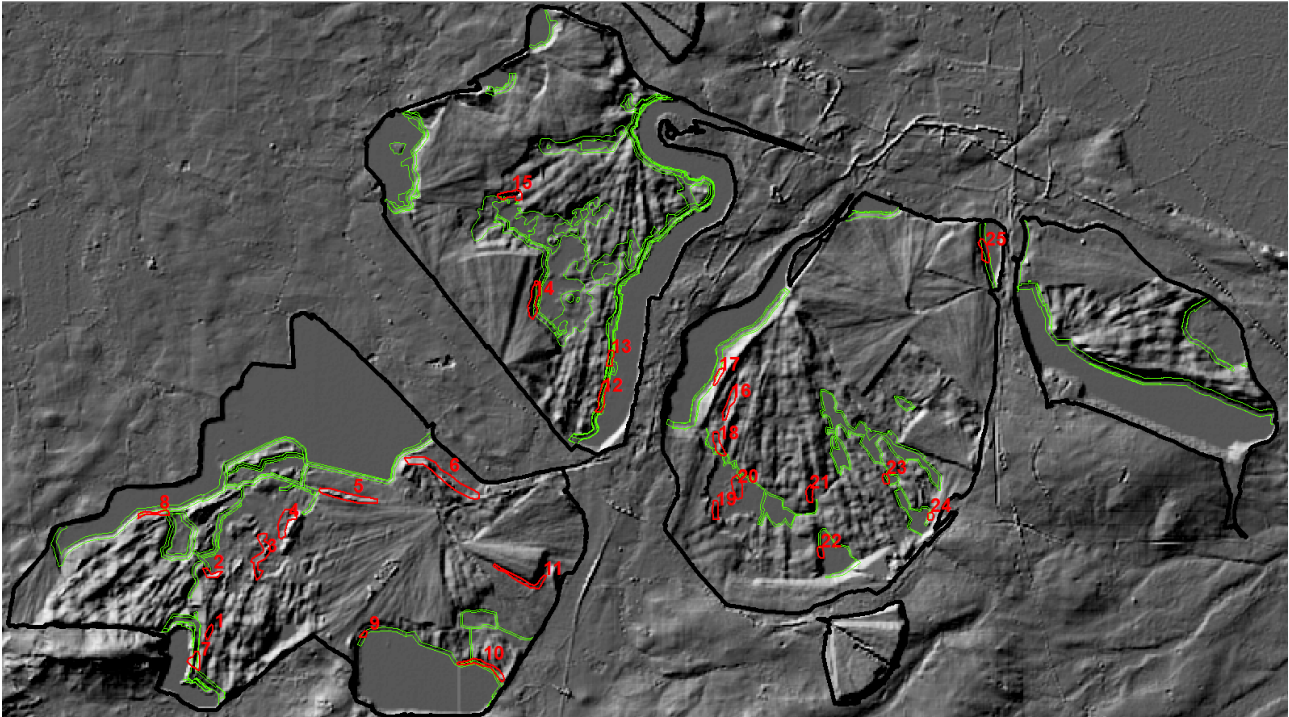


Abb. 31: Gefährdete Böschungen (rot) mit einem Gefährdungspotenzial $> 0,3$ (Prognose 2014) und Böschungswinkel > 5 Grad; grün: Verdichtungstrassen

Es bleibt zukünftigen detaillierten geotechnischen Untersuchungen und Berechnungen vorbehalten, das Risikopotenzial der hier als gefährdet eingestuften Gebiete und Böschungen exakt zu bewerten und weitere Schlussfolgerungen hinsichtlich erforderlicher Sicherungs-/Sanierungsmaßnahmen zu treffen.

7 Schlussfolgerungen

Mit den bei der LMBV flächendeckend verfügbaren Daten lässt sich im Nordraum Lausitz das geotechnische Gefahrenpotenzial der Innenkippen infolge Grundwasserwiederanstieg gut abschätzen. Das für die Analyse des Gefährdungspotenzials eingesetzte Verfahren der Künstlichen Neuronalen Netze erkennt sicher räumliche und zeitliche Zusammenhänge zwischen den bekannten Ereignissen und den potenziell kontrollierenden Faktoren.

Im Ergebnis der Bearbeitung wurden 34 Gebiete (Stand 2013) mit 25 meist darin enthaltenen Böschungen (Stand 2014) als gefährdet identifiziert und für eine weitergehende detaillierte ingenieurtechnische Bearbeitung/Beurteilung/Monitoring vorgeschlagen.

Die vorliegenden Gefahrenpotenzialkarten gestatten eine zielgerichtete Planung der aktiven Sanierungsarbeiten und der geplanten Nachnutzung.

Für die flächenhafte Beurteilung der Stabilität der Kippen ist lediglich die Kenntnis der folgenden Parameter erforderlich:

- zeitabhängige Daten mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens einem Jahr:
 - Relief der Tagebauoberfläche
 - Lage der Grundwasseroberfläche
 - Umringe der geotechnischen Ereignisse
- nichtzeitabhängige Daten:
 - Tagebauliegendes der Kippe
 - stoffliche Zusammensetzung der Kippe (Körnung, Gehalt an Kohle und Kalk)

Verfahren und die Ergebnisse sind sehr wahrscheinlich auf die gesamte Lausitz übertragbar.

8 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die sehr angenehme und konstruktive Zusammenarbeit bei den Projektbeteiligten der LMBV mbH (verschiedene Fachabteilungen: Geoinformatik, Geologie, Geotechnik, Grundsätze und Markscheiderei). Den geotechnischen Sachverständigen Herrn Steffen Friedrich, Matthias Götz, Rico Eler und Jürgen Keßler sowie den Herrn Jörg Weißbach und Sebastian Szczyrba sei gedankt für die zahlreichen interessanten und zielgerichteten Diskussionen zum Verfahren und den Ergebnissen sowie zu den geotechnischen Grundlagen. Weiterhin bedanken wir uns beim gesamten Geotechnischen Beirat der LMBV mbH für die konstruktiven und zielführenden Diskussionen.

LITERATUR

Dennhardt, Michael; Förster, Wolfgang: Erste Ergebnisse für die Bewertung von Kippen mit Gefährdungsfaktoren; In: Kudla, Wolfram (eds.): Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus : im Rahmen des Freiburger Forschungsforums 63. Berg und Hüttenmännischer Tag. Reihe C Heft 3 (2012). Freiberg: 2012.

Kallmeier, Enrico; Roscher, Marco; Böhnke, Robert; Barth, Andreas; Drebenstedt, Carsten; Knobloch, Andreas; Noack, Silke; Lucke, Beate: Modellierung und Bewertung der Stabilität von Tagebaukippen mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN); In: Kudla, Wolfram (eds.): Beiträge zum 2. Kolloquium Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus. Reihe C, Heft 5 (2014). Freiberg: 2014.

Kudla, Wolfram (eds.): Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus : im Rahmen des Freiburger Forschungsforums 63. Berg und Hüttenmännischer Tag. Reihe C, Heft 3 (2012). Freiberg: 2012.

Kudla, Wolfram (eds.): Beiträge zum 2. Kolloquium Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus. Reihe C, Heft 5 (2014). Freiberg: 2014.

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft: Lausitzer Braunkohlerevier – Wandlungen und Perspektiven. Heft 20 (Schlabendorf) und Heft 21 (Seese). August 2012.

Noack, Silke; Barth, Andreas; Irkhin, Aleksey, Bennewitz, Evelyn; Schmidt, Frank: Spatial Modeling of Natural Phenomena and Events with Artificial Neural Networks and GIS. International Journal of Applied Geospatial Research (IJAGR), Volume 3 (1), p. 1-20, 2012.

Noack, Silke; Knobloch, Andreas; Etzold, Sven Heico; Barth, Andreas; Kallmeier, Enrico: Spatial predictive mapping using artificial neural networks. Joint International Conference on Geospatial Theory, Processing, Modelling and Applications, Toronto 2014.

Roscher, Marco; Kallmeier, Enrico; Barth, Andreas; Drebenstedt, Carsten; Götz, Matthias: Aufbau eines integrierten Kippensicherheits- und Bewertungssystems (IKSB). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt für die LMBV mbH (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft). Unveröffentlicht. Beak Consultants GmbH und TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 07.02.2014.