

Seismisch-Hydraulisches-Geotechnisches Monitoringsystem auf der IK Schlabendorf-Süd

Daniel Blumrich¹, Thomas Schicht¹, Beate Lucke²

¹K-UTECH AG Salt Technologies, Sondershausen; ²LMBV mbH, Senftenberg

Zusammenfassung

Der Rekultivierung der ehemaligen Lausitzer Braunkohleinnenkippen kommt durch den beschlossenen Kohleausstieg der Bundesrepublik Deutschland eine bedeutende Rolle zur nachhaltigen und wirtschaftlich verträglichen Nutzung dieser Flächen bei. Die wassergesättigten, locker gelagerten Sande neigen teilweise zur spontanen Verflüssigung, weshalb große Innenkippenbereiche gegenwärtig gesperrt sind. Um die Gebiete u.a. touristisch, land- und forstwirtschaftlich nutzen zu können, werden sie mittels schonender Sprengverdichtung (SSPV) oder Rütteldruckverdichtung (RDV) verdichtet. Zur Überwachung dieser Arbeiten und zur Gewährleistung der Sicherheit der Menschen auf den Innenkippen kann eine seismische Überwachung effektiv eingesetzt werden. Verflüssigungsereignisse strahlen seismische Energie in ausreichend hohem Maße ab, um die resultierenden seismischen Ereignisse mehrere Kilometer weit messen zu können. Daher lassen sich große Flächen mit geringem Aufwand überwachen. Es wird ein Workflow zur Auswertung seismischer Ereignisse und der Gefahrenbewertung dieser Ereignisse entworfen. Die Zuverlässigkeit der Gefahrenbewertung konnte für Verflüssigungsereignisse auf der Innenkippe Schlabendorf-Süd statistisch nachgewiesen werden.

1 Einleitung

Im Lausitzer Braunkohlerevier wird seit Mitte des 19. Jahrhunderts Braunkohle vor allem zur Stromerzeugung gefördert. Das Braunkohleflöz liegt in einer Teufe von 35-120 Metern und ist ungefähr 8-16 Meter mächtig. Dem Lausitzer Revier kommt in den Bundesländern Brandenburg und Sachsen vor allem als Arbeitgeber in der Region eine bedeutende Rolle zu. Aufgrund des beschlossenen Kohleausstiegs der Bundesrepublik Deutschland tragen Rekultivierungskonzepte der ehemaligen Innenkippen entscheidend zur Entwicklung der Region bei. Um das durch die Braunkohleentnahme verlorene Volumen auszugleichen, wurden und werden Restlöcher geflutet. Die daraus entstehende Lausitzer Seenlandschaft soll den Tourismus fördern und als wirtschaftliche Stütze nach dem Bergbau dienen.

Die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) übernimmt als bergrechtlich verantwortliches Unternehmen die Planung und Umsetzung der bergbaulichen Grundsicherungen eines Großteils der Lausitzer Altlasten z.B. der Bergbaufolgelandschaften Klettwitz, Meuro oder Spreetal. Bedingt durch die locker gelagerten

Sande besteht die Gefahr von Bodenverflüssigungsereignissen auf nicht sanierten Innenkippen. Zur Verdichtung der Sande und damit Stabilisierung der Innenkippen werden u.a. schonende Sprengverdichtungen (SSPV) und Rütteldruckverdichtungen (RDV) durchgeführt. Diese Verfahren stellen eine effektive Methode zur Herstellung der Sicherheit und damit Rekultivierung der Lausitzer Innenkippen dar.

Im Rahmen des SHGM Projekts zur Entwicklung eines komplexen seismischen, hydraulischen und geotechnischen Monitoringsystems werden spontane Bodenverflüssigungsereignisse auf der Innenkippe Schlabendorf-Süd und im Raum Lausitz genauer untersucht. Solche Ereignisse können bis zu mehrere Dutzend Hektar Fläche erfassen, wie z.B. am 18.12.2017 (siehe Abbildung 1). Es war eine Fläche von 39,8 ha betroffen mit maximalen Senkungen bis 9 m sowie maximalen Hebungen bis 3,4 m. Das Ziel des SHGM Projekts ist die Entwicklung eines effektiven Überwachungssystems zum möglichst frühen erkennen und warnen vor Verflüssigungsereignissen. Weiterhin wird ein besseres Verständnis zum Ablauf und den Ursachen dieser Ereignisse entwickelt.



Abb. 1: Verflüssigungsereignis vom 18.12.2017; Straße über Innenkippe Schlabendorf-Süd zeigt deutliche Staffelbrüche; betroffene Fläche: 39,8 ha

2 Seismische Überwachung der IK Schlabendorf-Süd

K-UTEC AG Salt Technologies entwickelt und betreibt das seismische Überwachungssystem auf der Innenkippe Schlabendorf-Süd. Das System besteht aus 16 5s Dreikomponenten Messpunkten an der Oberfläche, sowie vier Dreikomponenten Beschleunigungsauf-

nehmern in Bohrlöchern in ca. 30 m Teufe. Die Oberflächenmesspunkte wurden jeweils in einem ca. halben Meter tiefen Schacht auf einem Betonfundament installiert. Dadurch wird eine gute Ankopplung an den Untergrund gewährleistet, gleichzeitig aber auch direkte Störeinflüsse durch Wind reduziert. Die Stromversorgung wird jeweils durch ein Solarmodul gewährleistet, wobei die Pufferbatterie über ausreichend Kapazität für einen Weiterbetrieb des jeweiligen Messpunktes für sieben Tage verfügt. Mittels integriertem LTE-Modul wird die Datenübertragung realisiert. Damit können durchgängige 24 Stunden Messungen mit einer Abtastfrequenz $f=100$ Hz sowie zusätzlich getriggerte Daten mit einer Abtastfrequenz $f=5$ kHz übertragen werden.

Durch die engmaschige Überwachung des ca. 33 km² großen Gebiets mit 16 Oberflächenmesspunkten können auch energetisch schwache seismische Ereignisse noch gemessen werden. Dadurch ist sichergestellt, dass sowohl energetisch starke Ereignisse als auch schwache Ereignisse miteinander verglichen werden können. Die Bohrlochmesspunkte wurden installiert, um primär Raumwellen, welche sich durch den Kippenkörper ausbreiten, in einer rauschärmeren Umgebung messen zu können. Während des Betriebs des Messsystems stellte sich heraus, dass Raumwellen sehr stark gedämpft werden und oft nur wenige hundert Meter weit messbar sind. Bei Verflüssigungsereignissen auf der Innenkippe entstehen sowohl Rayleigh- als auch Love-Wellen, welche aufgrund der größeren Amplituden und geringeren Dämpfung sehr gut an den Oberflächenpunkten gemessen werden können.

2.1 Verflüssigungsereignisse

Verflüssigungsereignisse auf den ehemaligen Innenkippen des Lausitzer Reviers sind geotechnische Vorgänge, bei denen die wassergesättigten Sande ihre Korn-Korn Kontakte verlieren. Durch diesen Verlust der Stabilität der Sandmatrix verflüssigte Sedimente fließen bevorzugt entlang topographischer Gradienten. Dieser Vorgang findet unterhalb der Grundwasserlinie statt, d.h. in der wassergesättigten Kippe. Erreicht das verflüssigte Volumen eine kritische Größe, bricht die überliegende Deckschicht (genannt: erdfeuchte Überdeckung) ein. Diese Einbrüche können Abbruchkanten bis mehrere Meter Tiefe erreichen und stellen ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar. Vergleiche zwischen seismischen Ereignissen mit sichtbaren Veränderungen an der Geländeoberfläche (Typ S Ereignisse) und seismischen Ereignissen ohne sichtbaren Veränderungen an der Geländeoberfläche (Typ N Ereignisse) zeigen eine deutlich stärkere seismische Energieabstrahlung für Typ S Ereignisse. Beide Ereignistypen zeigen in Schlabendorf-Süd deutliche Oberflächenwellen. Ein Beispiel für ein Typ S Ereignis mit deutlich polarisierter Rayleigh-Welle und nachfolgendem Love-Wellenzug zeigt Abbildung 2. Das dargestellte Hodogramm zeigt die Bodenbewegung am Messpunkt 15 für den Rayleigh-Wellenzug. Dieses Ereignis ist das Erstergebnis des Verflüssigungsereignisses vom 18.12.2017 (siehe Abbildung 1).

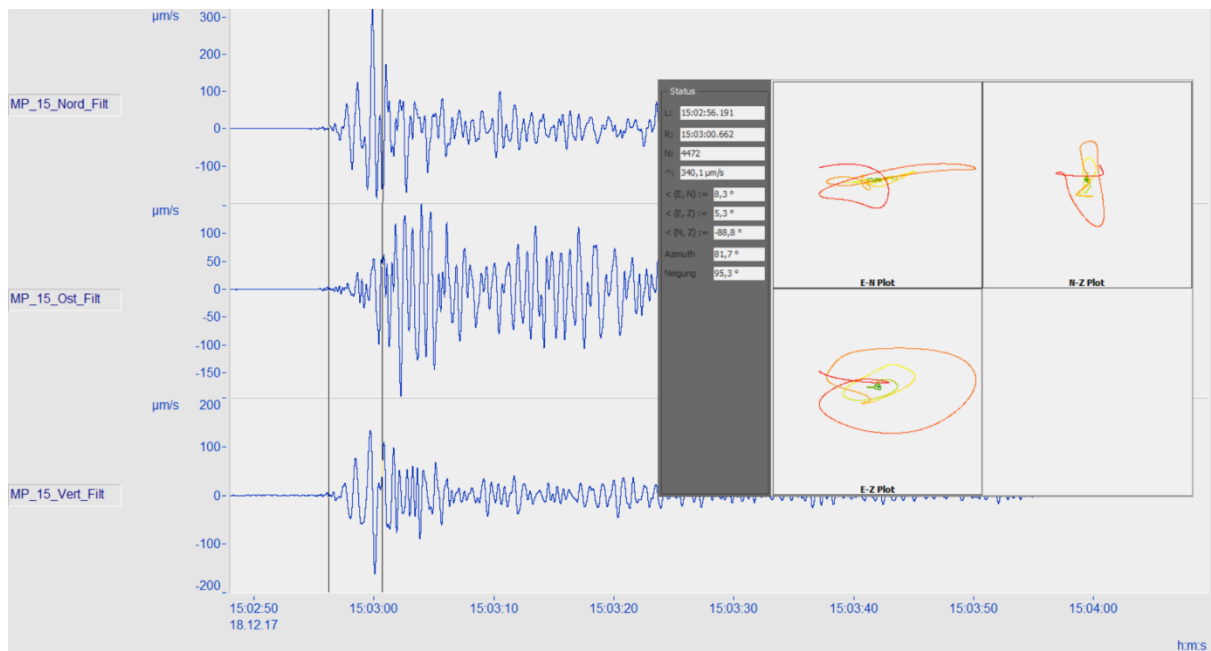


Abb. 2: Zeitreihe für Typ S Ereignis vom 18.12.2017 und dazugehöriges Hodogramm; Zeitreihe gefiltert $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 3,0 \text{ Hz}$; Hodogramm zeigt Partikelbewegung der Rayleigh-Welle, anschließend folgt langer Love-Wellenzug

Starke seismische Ereignisse in der Nähe von Messpunkten zeigen sehr schwache Raumwellen. Diese werden nach wenigen hundert Metern so stark gedämpft, dass sie im seismischen Umgebungsrauschen untergehen und nicht mehr messbar sind. Die ungewöhnlich starke Dämpfung der Raumwellen kann mit den lockergelagerten wassergesättigten Sanden der Innenkippe begründet werden. Da die Innenkippe Schlabendorf-Süd nur etwa 40 m mächtig ist, werden die Oberflächenwellen mit ungefähren Wellenlängen $\lambda = 150 \text{ m}$ wesentlich weniger beeinflusst, weil das unter der Innenkippe liegende Gewachsene eine geringere Dämpfung zeigt.

Vergleiche zwischen Typ S und Typ N Ereignissen zeigen als einzigen Unterschied in den seismischen Merkmalen die Magnitude und damit einen deutlichen Unterschied in der seismischen Energieabstrahlung des Quellprozesses. Aus dieser Gleichheit der seismischen Signale von Typ S und Typ N Ereignissen wird geschlussfolgert, dass Typ N Ereignisse, obwohl sie keine Veränderungen an der Geländeoberfläche zeigen, auch Verflüssigungsereignisse in der wassergesättigten Kippe sind. Die unterschiedlich starke Energieabstrahlung lässt sich durch die Größe des verflüssigten Volumens begründen. Bei Typ S Ereignissen wird eine kritische Volumengröße verflüssigt. Dies führt zu einem Bruch der erdfeuchten Überdeckung und somit zu sichtbaren Veränderungen der Geländeoberfläche. Die Größe des kritischen Volumens hängt von mehreren Faktoren ab, wie z.B. der Stabilität der Sandkornmatrix, der Mächtigkeit der erdfeuchten Überdeckung und vom Bewuchs.

3 Lokalisierung seismischer Ereignisse

Seismische Ereignisse werden mittels Rayleigh- und Love-Wellen geortet. Dabei sind Rayleigh-Wellen mit einer Wellengeschwindigkeit von ca. $v = 380$ m/s schneller als Love-Wellen mit ca. $v = 230$ m/s. Diese Geschwindigkeiten gelten nur für den Innenkippenbereich, außerhalb breiten sich beide Wellen schneller aus. Das Amplitudenverhältnis von Rayleigh- zu Love-Wellen ist nicht konstant. Für verschiedene Verflüssigungsereignisse kann dieses Verhältnis sehr stark schwanken, so dass überprüft werden muss, ob Rayleigh- oder Love-Wellen das Wellenbild dominieren. Für diese Überprüfung eignen sich Hodogramme, welche die unterschiedliche Polarisierung der beiden Oberflächenwellen zeigen, wie in Abbildung 2 für die Rayleigh-Welle dargestellt. Aus der Horizontalprojektion der Wellenbewegung (E-N-Plot) lässt sich der Einfallswinkel der Welle in der horizontalen Ebene ermitteln. Durch Triangulation der Einfallswinkel an mehreren Messpunkten kann der Herd des seismischen Ereignisses bereits abgeschätzt werden. Weiterhin hilft die Hodogrammdarstellung den genauen Zeitpunkt des Ersteinsatzes der jeweiligen Phase zu picken. Das ist besonders für den Love-Einsatz, welcher meist durch Rayleigh-Wellen überlagert ist, von entscheidender Bedeutung für qualitativ hochwertige Lokalisierungen. Aus den Einsatzzeiten-Picks und den Wellengeschwindigkeiten wird der Herd lokalisiert. Dieser wird anschließend mit der Triangulation aus den Einfallswinkeln überprüft. Dies dient der Qualitätskontrolle der Lokalisierung und um möglicherweise falsch konvergierte Lösungen des Lokalisierungsalgorithmus auszuschließen.

3.1 Unterscheidung Typ S und Typ N Ereignisse

Die Unterscheidbarkeit von Ereignissen mit Geländeänderungen (Typ S) und ohne (Typ N) ist entscheidend für den Erfolg einer seismischen Überwachung von Innenkippen. Dafür wird die systematisch unterschiedlich starke seismische Energieabstrahlung von Typ S und Typ N Ereignissen ausgenutzt. Dazu wurde eine Lokalmagnitude M_{Lau} definiert, um die Vergleichbarkeit der Verflüssigungsereignisse untereinander zu gewährleisten. Diese lokale Lausitzmagnitude nutzt den Median der Magnituden an den einzelnen Messpunkten des Überwachungssystems, da diese durch den teilweise sehr stark heterogenen Untergrund stark schwanken können. Die Magnitude bildet direkt die maximale Amplitude an den einzelnen Messpunkten ab und damit indirekt die maximale seismische Energieabstrahlung des Verflüssigungsereignisses. Durch den Vergleich von Typ S mit Typ N Ereignissen lässt sich eine Schwellwertmagnitude $M_{\text{Lau,Gren}} = 1,4$ definieren. Überschreitet ein seismisches Ereignis diese Grenzmagnitude, so ist es mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ein Typ S Ereignis. Die Gültigkeit dieser Schwellwertmagnitude konnte auf Grundlage der 275 seismischen Ereignisse seit Beginn der Überwachung 12/2013 auf der Innenkippe Schlabendorf-Süd statistisch nachgewiesen werden.

Weiterhin steigt die Wahrscheinlichkeit eines Typ S Ereignisses, wenn die seismischen Registrierungen als Kettenereignisse auftreten, d.h. es treten mehrere seismische Ereignisse

mit einem klaren zeitlichen und räumlichen Zusammenhang auf. Der Grund dafür ist, dass flächenmäßig große Verflüssigungsereignisse mit Veränderungen an der Geländeoberfläche oft gestaffelt ablaufen. Daher werden mehrere seismische Ereignisse angeregt. Da bei Typ N Ereignissen nur ein kleines Volumen verflüssigt wird, breiten sich diese Ereignisse meist nicht staffelartig aus und verursachen nur ein schwaches seismisches Ereignis.

3.2 Workflow

Zur seismischen Überwachung der ehemaligen Innenkippen des Lausitzer Reviers lässt sich ein einfacher Workflow erarbeiten wie er in Abbildung 3 dargestellt ist. Viele dieser Arbeitsschritte lassen sich automatisieren, um die Zeit zwischen Trigger und einer möglichen Warnung vor Gefahrenbereichen zu verringern. Das Filtern der Daten erfolgt grundsätzlich im gleichen Frequenzband $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 3,0 \text{ Hz}$. Dadurch liegt das gefilterte Signal in einem Frequenzbereich, welcher die Grundmoden der Oberflächenwellen enthält. Da Rayleigh-Wellen dispersiv sind, d.h. ihre Wellengeschwindigkeit hängt von der Frequenz ab, ist dies für die Einsatzzeitenpicks unabdingbar. Weiterhin wird durch das wegfiltern höherer Schwingmoden die Partikelbewegung in der Hodogrammdarstellung geglättet. Dadurch wird der Fehler des ermittelten Einfallswinkels vermindert. Dieser Winkel kann aus der Horizontalprojektion der Komponenten der Rayleigh- als auch Love-Welle ermittelt werden. Die Analyse der Partikelbewegung hilft weiterhin dabei die Einsatzzeiten der verschiedenen Phasen sehr genau zu picken. Nachdem die Lokalisierung berechnet wurde, kann das Ergebnis mit der Triangulation der Einfallswinkel verglichen und bewertet werden. Dadurch werden vor allem falsch konvergierte Lokalisierungen ausgeschlossen. Durch die Mehrdeutigkeit der mathematischen Lösung des zugrunde liegenden Gleichungssystems können mehrere lokale Minima entstehen. Die Bewertung mittels Einfallswinkel ist daher eine einfache Möglichkeit die Konvergenz der Lösung zum globalen Minimum der Laufzeitenminimierung sicher zu stellen.

Nach der Berechnung des Herdes wird die lokale Lausitzmagnitude M_{Lau} ermittelt. Anhand des festgestellten Grenzwertes für Typ S und Typ N Ereignisse von $M_{\text{Lau,Gren}} = 1,4$ kann eine Prognose mit hoher Wahrscheinlichkeit erstellt werden, ob es Veränderungen an der Geländeoberfläche gab. Somit kann eine Gefahrenwarnung an alle Personen ausgegeben werden, welche eine Erlaubnis zum Betreten der entsprechenden Gebiete erhalten haben.

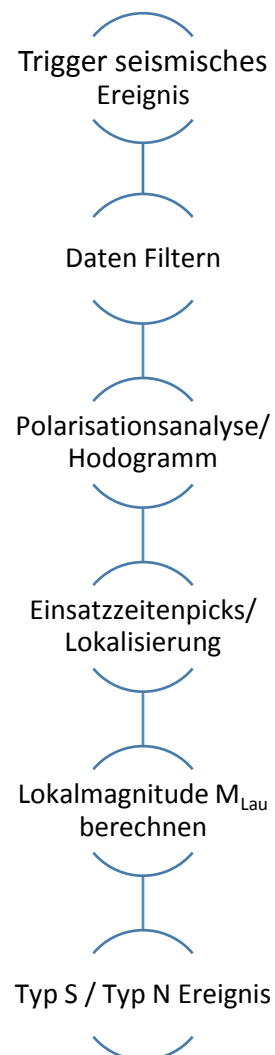


Abb. 3: Workflow zur Lokalisierung und Bewertung seismischer Ereignisse der Lausitzer Innenkippen

Projektpartner SHGM

- Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau- Verwaltungsgesellschaft mbH
- BIUG Beratende Ingenieure für Umweltgeotechnik und Grundbau GmbH
- TU Bergakademie Freiberg
 - Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
 - Institut für Geophysik und Geoinformatik
- K-UTEC AG Salt Technologies