

# Überwachung von Untergrundbewegungen mithilfe geophysikalischer Messungen in Setzungspegeln

Depth related observation of underground movement by geophysical measurements using subsidence monitoring wells

Von J. GREITZKE, L. KUSCHEL und DR. G. BAUMANN\*

\*Jan Greitzke, Lars Kuschel, Dr. Gunther Baumann, Bohrlochmessung-Storkow GmbH.  
E-Mail: greitzke@blm-storkow.de

0179-3187/21/11 DOI 10.19225/211103  
© 2021 DWV Media Group GmbH

## Abstract

Underground deformation processes cause subsidence whose effects need to be observed by technical measurements. In general, surface leveling is used for that purpose. A depth related observation of subsidence in one or even several different depths still appears to be challenging.

This article introduces a borehole geophysical method which allows the observation of depth related underground movements along a continuous logging path. Magnetic markers are therefore either shot into the surrounding rock (projectiles) or magnetically activated disks are installed during filling periods. The projectile markers are shot through high density polyethylene-casings and the annulus to enable the observation of actual movements of

the surrounding rock. Geophysical measurements are used afterwards to detect the depth position (distance to the pipe top) of each of the magnetic markers. Periodically repeated measurements allow the continuous observation of depth related underground movements that, for instance, appear inside or below landfills, the cap rock of storage caverns or in former mining regions. The demonstrated measuring system can be set up at any time and place, since the only requirements are a small sized borehole with HDPE-casing and an annulus filled with sand.

## Zusammenfassung

Deformationsvorgänge im Untergrund verursachen Setzungen, deren Auswirkungen messtechnisch überwacht werden müssen. Setzungsmessungen erfolgen im Allgemeinen durch Höhenmessungen bzw. Nivellements oder den Einsatz von Dehnungsmessstreifen. Die Überwachung von Setzungen in einer oder sogar in verschiedenen Tiefen des Untergrundes stellt jedoch messtechnisch nach wie vor eine Herausforderung dar.

Nachfolgend soll ein bohrlochgeophysikalisches Verfahren vorgestellt werden, das es ermöglicht, in verschiedenen Teufen entlang einer Messlinie Setzungsmessungen durchzuführen. Hierbei werden magnetische Marken mit einer Kartuschenladung ins Gebirge eingebracht oder im Rahmen einer Schüttung magnetisch markierte Platten verlegt. Das Einbringen der Marken erfolgt dabei aus kunststoffverrohrten Bohrungen heraus durch den Ringraum ins Gebirge, wodurch nicht die Setzungen im Ringraum sondern im unverritzten Gebirge erfasst werden. Mittels einer geophysikalischen Bohrlochmesssonde werden die entsprechenden Markierungen in ihrer Teufenlage (Abstand der Marke zur Rohroberkante) bestimmt. Die zyklische Wiederholung solcher Messungen ermöglicht die fortlaufende Beobachtung von Bewegungen im Untergrund, wie sie in Deponiekörpern und darunter, im Deckgebirge von Kavernen oder auch im Altbergbau stattfinden können. Dieses Messprinzip kann dabei jederzeit auch nachträglich auf zu überwachenden Untergründen eingerichtet werden.

## EEK Aus der Redaktion

### Leserbriefe

Diskutieren Sie mit und schreiben Sie uns Ihre Meinung per Mail an:  
leserbriefe@eid.de

(Foto: Bohrlochmessung-Storkow GmbH)

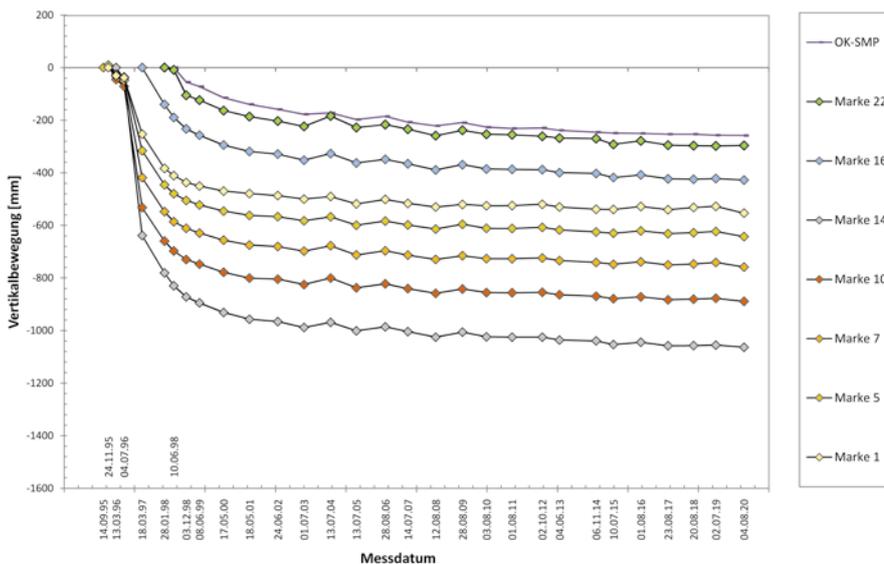


Abb. 1 Zeitreihe von Setzungsmessungen für insgesamt 22 Magnetmarken (exemplarisch dargestellt: 7) über einen Teufenbereich von 56 m und einen Zeitraum von 25 Jahren. Dargestellt ist die vertikale Bewegung des Untergrundes (Ordinate) in Abhängigkeit von der fortschreitenden Zeit (Abszisse) für jede einzelne Marke. Die Nummerierung der Marken erfolgte fortlaufend, beginnend mit der tiefsten Marke. (Quelle: Lausitz Energie Bergbau AG)

ren Teufen waren die Bewegungen des Untergrundes deutlich schwächer ausgeprägt. Der Deponiekörper selber zeigte ein homogenes Setzungsverhalten und damit keine Teufenabhängigkeit. Mit dem weitestgehenden Abschluss der Lastsetzungen stellte sich über die Jahre ein immer mehr teufenunabhängiges, geringfügiges Bewegungsverhalten des Untergrundes ein.

**Herkömmliche Monitoring-Verfahren**

Üblicherweise erfolgen Setzungsmessungen in Form von Nivellements und mithilfe von Extensometern. Letztgenannte Messgeräte können jedoch nur dann zum Einsatz kommen, wenn eine Verankerung im Gebirge realisiert werden kann. Damit scheidet diese Methode für die Anwendung in Lockergesteins-Geologien aus. Geometrische Nivellements können zwar eine sehr hohe Genauigkeit erzielen, liefern jedoch nur Auskünfte über Bewegungen an der Erdoberfläche. Ist die Beobachtung von Bewegungen in größerer Tiefe von Interesse, können Systeme zur hydrostatischen Nivellierung Anwendung finden. Der Einsatz solcher Systeme setzt jedoch einiges an Vorplanung voraus, da sie bereits während des Schüttungsvorgangs installiert werden müssen. Setzungspegel hingegen können vergleichsweise kostengünstig auch nachträglich eingebaut werden, wobei die in ihnen durchgeführten geophysikalischen Messungen Aussagen zu teufenabhängigen Bewegungen des Untergrundes liefern. Dadurch können Setzungen im Untergrund auch frühzeitig, bevor sie an der Erdoberfläche bemerkbar sind, erkannt werden.

**Das Prinzip der geophysikalischen Setzungsmessungen**

Das bohrlochgeophysikalische System zur Messung von Setzungen im Untergrund nach dem Verfahren der Bohrlochmessung - Storkow GmbH (Blm Storkow) besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: speziellen Messpegeln, der Messapparatur und einem Korrektursystem zur Genauigkeitssteigerung der Teufenbestimmung (Abb. 2). Beim Einrichten der Messpegel wird zunächst eine Bohrung bis in die gewünschte Tiefe niedergebracht. Der Ausbau der Bohrung erfolgt mit High-Density-Polyethylen (HDPE)-Rohren. Dieses Material wird deshalb genutzt, weil Rohre aus HDPE beim Einbringen von Magnetmarken (Abb. 3a) nicht splintern. Solche Magnetmarken werden für die anschließende Durchführung von Magnetik-Log (MAL)-Messungen mittels Dreikomponenten-Magnetometer nach dem Bau des Setzungspegels mithilfe von Kartuschenladungen in einem durchschnittlichen Abstand von 2,5-3,0 m zueinander durch den Ringraum des Pegels in den Untergrund eingebracht (Abb. 2). Das Markenetzgerät ist dabei so konstruiert, dass unterschiedliche Abstände von der Bohrlochachse realisiert werden können. Durch das Einbringen der Setzungsmarken über den Ringraum der Setzungspegel in den zu

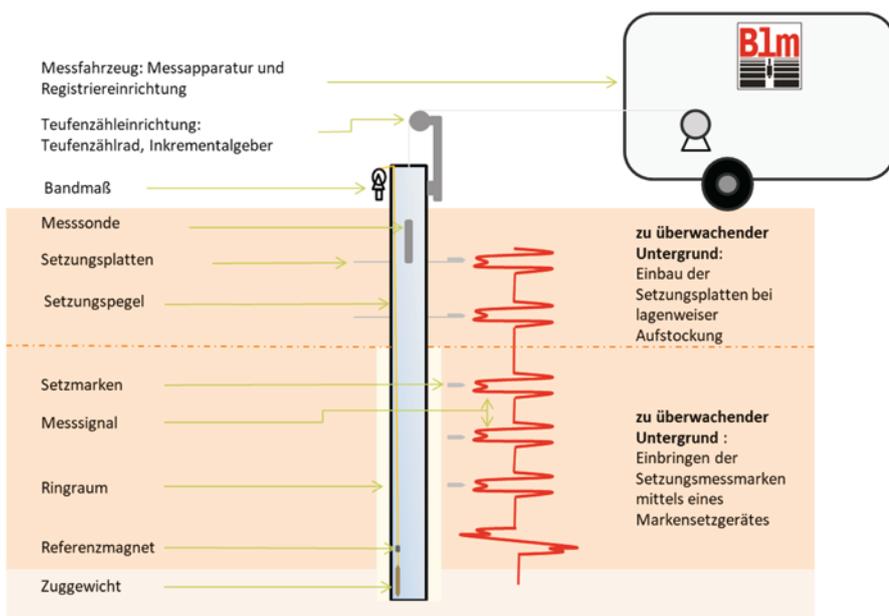


Abb. 2 Prinzipieller Aufbau des bohrlochgeophysikalischen Systems zur Messung von Setzungen im Untergrund nach dem Verfahren der Blm Storkow

**Die Setzungsproblematik**

Sowohl aufgrund natürlicher Ursachen als auch infolge von anthropogenen Einflüssen kann es im Untergrund zu Setzungserscheinungen kommen. Zur Messung von anthropogenen Einflüssen sind beispielsweise in der Deponieverordnung (DepV), Anhang 5, für Deponien jährliche Setzungsmessungen sowohl für die Ablagerungs- und Stilllegungsphase als auch für die Nachsorgephase vorgeschrieben. Jedoch können Setzungsmessungen im Allgemeinen überall auch dort sinnvoll sein, wo in größerer Menge lockere Stoffe abgelagert sind. Aus der Betrachtung von Zeitreihen, die auf der Grundlage solcher Messungen erstellt werden, können Aussa-

gen über die Stabilität des Untergrundes aber auch der Ablagerungen selber abgeleitet werden. In diesem Artikel soll als Alternative bzw. Ergänzung zu bereits etablierten Setzungsmessverfahren ein bohrlochgeophysikalisches Messprinzip erläutert werden, welches die Erstellung von Zeitreihen nicht nur oberflächennah, sondern auch in Anhängigkeit von der Teufe ermöglicht. So verdeutlicht die in Abbildung 1 dargestellte Zeitreihe, dass markante Setzungseignisse, die in diesem Pegel durch fortschreitende Aufschüttung einer Deponie induziert wurden, sich zunächst am stärksten auf den unmittelbaren Deponieuntergrund (nahe der Oberkante des Setzungspegels OK-SMP) auswirkten. In größte-

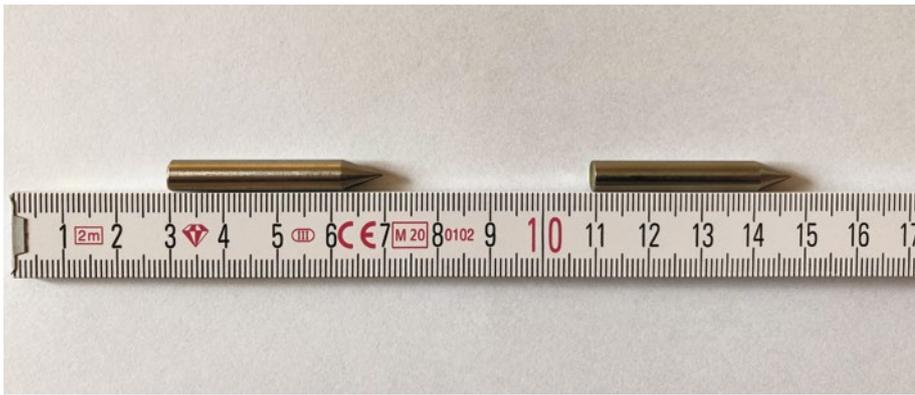


Abb. 3a Magnetmarken



Abb. 3b Magnetisch markierte Platte

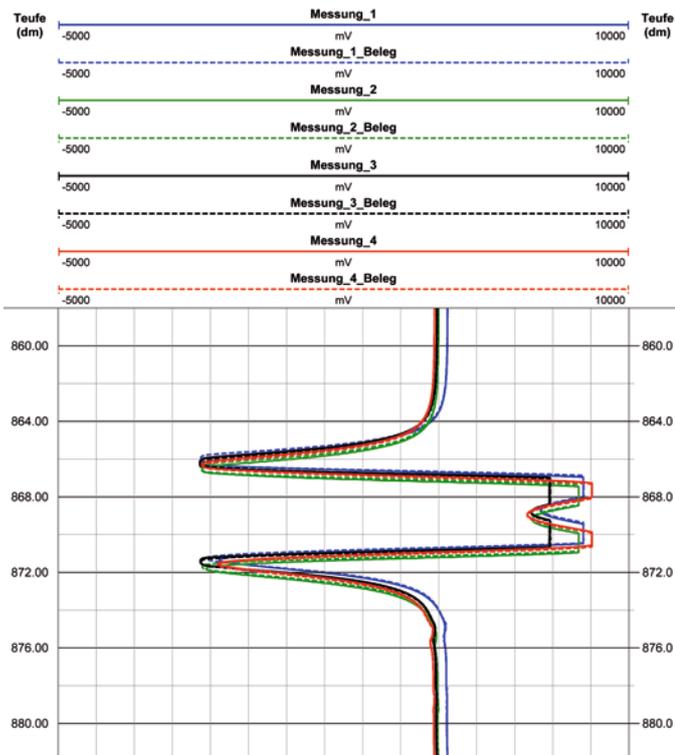


Abb. 4 Darstellung der gemessenen Rohdaten (induzierte Spannung in mV) in Abhängigkeit von der Teufe an einer Magnetmarke in einem Setzungspegel (vier Wiederholungsmessungen inklusive Belegmessungen)

Magnetik-Messsonde die Lage der eingeschossenen Magnetmarken und der magnetisch markierten Platten relativ zur Pegeloberkante bestimmt. Die Magnetmarken erzeugen innerhalb des geschütteten Körpers (wie beispielsweise eine Deponie) eine charakteristische Anomalie der magnetischen Flussdichte, welche im Spulensystem der Messsonde die Induktion einer Spannung bewirkt. Die Position der Magnetmarken wird somit für jede Teufe mit hoher Genauigkeit detektiert (Abb. 2, rote Kurve). Eine zweite Messfahrt als Beleg dient der Absicherung der Messqualität. Die periodische Wiederholung der Messungen erlaubt die kontinuierliche Beobachtung von Positionsänderungen der Marken (Abb. 4).

**Das Permanente Teufenreferenzsystem (PTRS)**

Bei der Auswertung von Setzungsmessungen mittels Magnetik-Logs werden die Positionen der eingebrachten magnetischen Marken relativ zur Oberkante des Pegels bestimmt. Die Höhenlage dieses Bezugspunktes wird mittels Feinnivellement eingemessen. Um die Genauigkeit bei der Bestimmung der Teufenlage der einzelnen Marken zu erhöhen, wird zusätzlich ein speziell für diese Anwendung entwickeltes Korrektursystem, das Permanente Teufenreferenzsystem (PTRS, modellhafter Aufbau siehe Abb. 5), verwendet. Es besteht aus einer zusätzlichen Magnetmarke, die in einer präzise eingemessenen Position auf einem Trägermaterial mit sehr geringen mechanischen und thermischen Deformationseigenschaften in dem Messpegel permanent eingehängt ist. Die Eigenschaften des Trägermaterials sorgen für eine hohe Lagekonstanz über lange Zeiträume. Die Teufenlage dieser Marke wird dabei als Referenzteufe verwendet, um die mit der Messapparatur gemessenen Teufen zu korrigieren.

Bei der Entwicklung des PTRS durch die Bohrlochmessung-Storkow GmbH ergaben Materialrecherchen, dass für das angesprochene Trägermaterial Glasfaserrundstäbe am besten geeignet sind. Diese sind selbst nicht magnetisch, temperaturbeständig und beständig gegenüber z. B. in Deponien vorhandenen chemischen Verbindungen. Des Weiteren weisen Glasfaserrundstäbe eine hohe Zugfestigkeit bei einem gleichzeitig hohen Maß an Flexibilität auf. Die benötigte Glasfaserrundstab-Länge wird für jeden Setzungsmesspegel speziell anhand einer geodätisch eingemessenen Referenzstrecke konfektioniert.

Auf dem Glasfaserrundstab wird als magnetische Referenzmarke ein Ringmagnet mit einer vertikalen Anordnung von Nord- und Südpol (parallel zur Bohrlochachse) angebracht. Ein solcher Magnet liefert ein charakteristisches, eindeutig identifizierbares Messsignal und kann immer als Referenzmarke erkannt und von den übrigen Marken eindeutig unterschieden werden (Abb. 6). Der Rundstab mit dem darauf befestigten Ringmagneten wird von einem ebenfalls

tersuchenden Untergrund ist gewährleistet, dass auch nur die „wahren“ Bewegungen des Untergrundes und nicht die Bewegungen im Ringraum des Pegels erfasst werden.

Im Fall einer Deponie beispielsweise kann bei fortschreitender Aufschüttung zusätzlich auch das HDPE-Rohr aufgestockt und mit magnetisch markierten Platten ausgerüstet werden (Abb. 3b) Mit der Herstellung des Oberflächenabschlusses der Deponie erfolgt abschließend das Einbinden der Messpegel in das Oberflächenabdichtungssystem.

Ist der Messpegel einmal errichtet, wird in zyklischen Zeitabständen mit einer Dreikomponenten-

speziell angefertigten Pegelkopf aufgenommen, welcher einen definierten Höhenbezugspunkt besitzt sowie die Ein- und Ausfahrt der Magnetik-Sonde ermöglicht. Ein unten am Glasfaserrundstab befestigtes Zuggewicht dient der Sicherung der Lagekonstanz der Referenzmarke.

**Auswertung der Messungen und Erstellung von Zeitreihen**

Nachdem die Magnetik-Log-Messungen in einem Setzungspegel durchgeführt wurden, erfolgt die Bestimmung der Markenpositionen anhand der grafisch dargestellten magnetischen Anomalien, welche durch die Magnetmarken bzw. die Setzungsplatten hervorgerufen werden. Es werden die Teufen bestimmt, in denen lokale Extremwerte (bei Magnetmarken und Setzungsplatten Maxima und Minima, bei den Referenzmarken Sattelpunkte) des aufgezeichneten Messsignals auftreten. Die Lokalisierung dieser Teufen erfolgt softwaregestützt.

Das verwendete Programm nutzt zwei unterschiedliche, voneinander unabhängige Methoden zur Teufenbestimmung. Die sogenannte „Flankenmethode“ ermittelt die Position des entsprechenden Extremums als den Mittelwert der Positionen der jeweils ober- und unterhalb des Extremwerts sichtbaren Flanken (numerische Lösung eines Nullstellen-Problems). Bei sehr steil ansteigenden Flanken kann die numerische Ermittlung der Nullstellen mit erhöhten Unsicherheiten behaftet sein. Auch ein zu flacher Anstieg der Flanken kann Fehlerquellen verursachen. In der überwiegenden Anzahl der Fälle liefert die „Flankenmethode“ jedoch zufriedenstellende Ergebnisse.

Der zweite Ansatz zur Teufenbestimmung ist die sogenannte „Fittingmethode“. Hier wird unter der Zugrundelegung eines magnetischen Dipols eine Magnetik-Log Messung simuliert. Die geometrischen Parameter des magnetischen Dipols werden so lange verändert, bis das aus dem Dipol-Modell resultierende synthetische Messsignal nach dem Kriterium der kleinsten Fehlerquadrate optimal an die real gemessenen Daten angepasst ist. Im Anschluss daran erfolgt eine Extremwertbestimmung anhand der modellierten Daten. Die Ergebnisse beider Methoden zur Teufenbestimmung können durch den Bearbeiter miteinander verglichen und evaluiert werden (Abb. 7).

Eine solche Teufenbestimmung findet nach jeder durchgeführten Setzungsmessung statt. Nach der Auswertung der aktuellen Messung erfolgt ein Vergleich mit den beim vorherigen Messeinsatz bestimmten Teufen der Magnetmarken, sodass die Untergrundbewegungen zwischen diesen Messzeitpunkten berechnet werden können. Durch die jeweils im Abstand von etwa 2,5–3,0 m vorhandenen Magnetmarken können so teufenabhängige Unterschiede des Setzungs- oder Hebevhaltens im zu beobachtenden Körper quantifiziert werden (Beispiel Setzung innerhalb und unterhalb einer

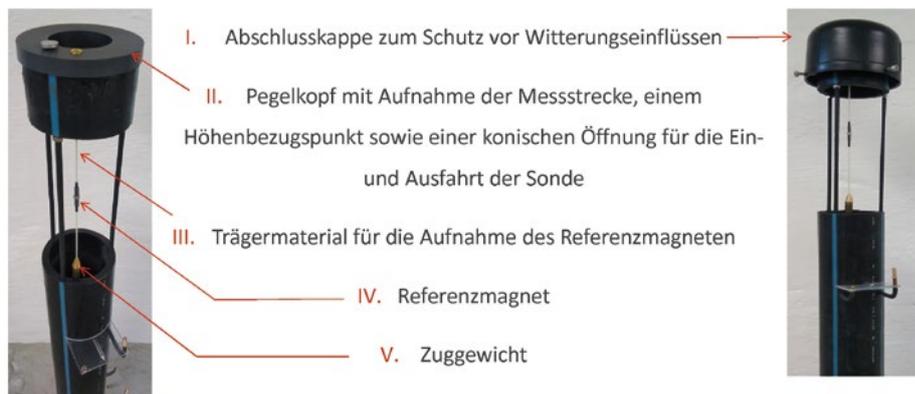


Abb. 5 Modellhafter Aufbau des Permanenten Teufenreferenzsystems (PTRS)

Aschedeponie siehe Abb. 1). Über eine kontinuierliche Beobachtung dieses teufenabhängigen Bewegungsverhaltens kann durch Kombination der Datensätze aus verschiedenen Setzungsmesspegeln eines Messfeldes ein dreidimensionales Bild des Bewegungsmusters erzeugt werden. Das oben vorgestellte Beispiel ermöglicht einen gesicherten Betrieb des Deponiekörpers während der Ablagerungs- sowie auch in der Stilllegungs- und Nachsorgephase. Übertragen auf vergleichbare Anwendungen lassen sich anhand solcher Untergrundbewegungsmodelle Risiken von zu erwartenden massenartigen Bodenbewegungen besser einschätzen und die Durchführung bzw. Notwendigkeit von Sanierungsarbeiten wird hinsichtlich des zeitlichen, technischen und räumlichen Aufwandes besser planbar.

Messungen nach dem Prinzip der Bohrlochmessung-Storkow GmbH. Als großer Vorteil der Setzungsmessungen ist hervorzuheben, dass die Setzungsmesspegel kostengünstig zu jedem Zeitpunkt des Deponiebetriebes errichtet oder erweitert werden können und im Gegensatz zu vielen anderen Messprinzipien Auskunft über teufenabhängige Bewegungen des Untergrundes ermöglichen. Nachteilig gegenüber traditionellen Methoden zur Überwachung von Setzungsbewegungen ist die geringere Messgenauigkeit des geophysikalischen Systems. Genauigkeiten, wie sie bei Extensometern und Nivellements erzielt werden, sind mithilfe der geophysikalischen Setzungsmessungen nicht realisierbar. Eine statistische Auswertung mehrerer Setzungsmessungen (Bestimmung der Standardabweichung der Messwerte) er-

**Fazit und Ausblick**

Das in diesem Artikel vorgestellte Prinzip der Setzungsmessungen mittels Magnetik-Logs findet gegenwärtig in rund 35 Setzungspegeln in verschiedenen Erdbauwerken, vorrangig im Lausitzer Raum Anwendung. Die Magnetik-Log-Messungen finden parallel zu weiteren Setzungsmessungen nach anderen Messprinzipien statt, deren Ergebnisse durch die hier gezeigte Methode bestätigt bzw. ergänzt werden. Insbesondere die Anwendung in Deponien und damit die Bestätigung von Setzungsprognosen, die seitens der Deponiebetreiber vorab erstellt wurden, gelang bisher anhand der

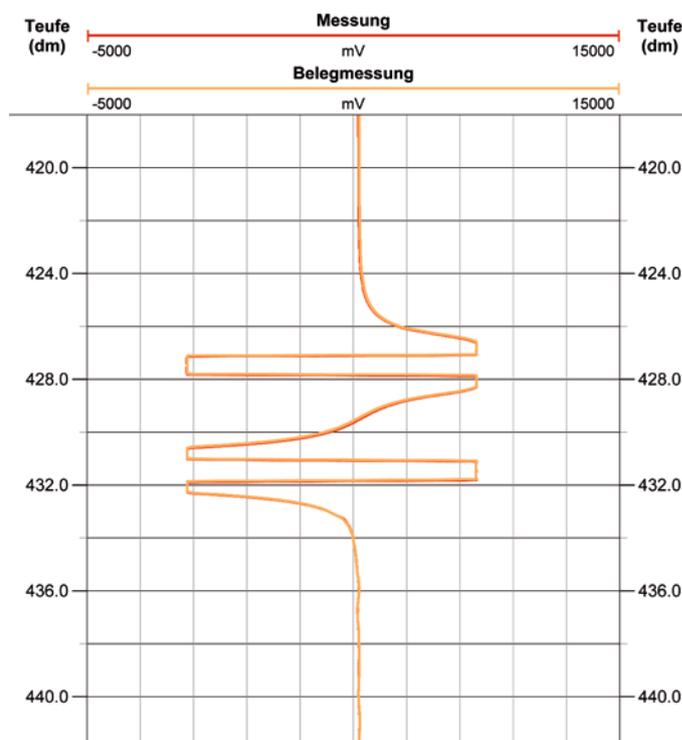


Abb. 6 Charakteristisches Messsignal eines für das PTRS verwendeten Ringmagneten

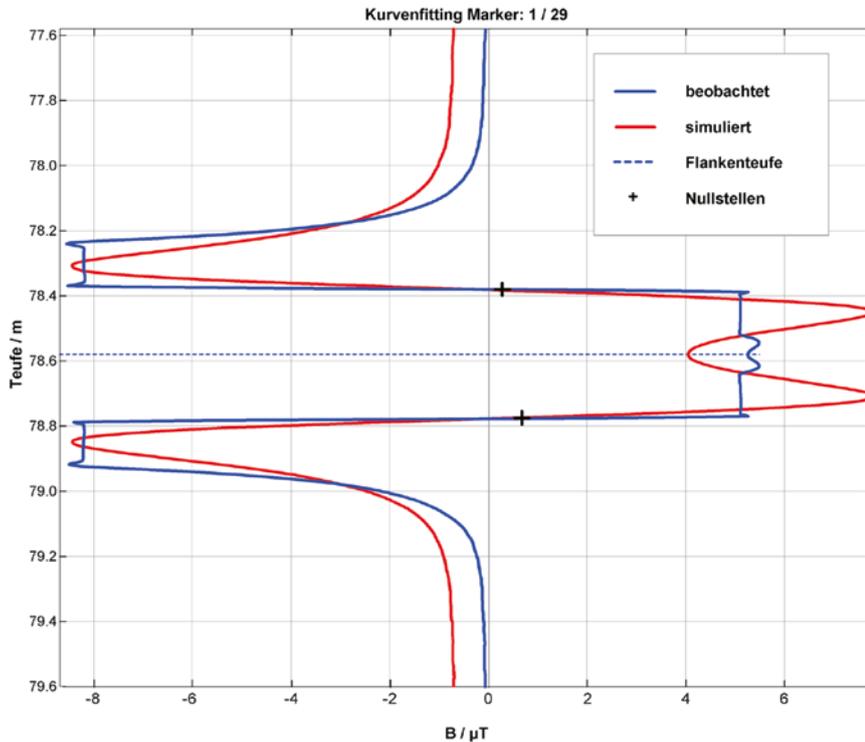


Abb. 7 Softwaregestützte Ermittlung der Teufe einer Magnetmarke mittels zweier unterschiedlicher Methoden. Dargestellt ist die magnetische Flussdichte in  $\mu\text{T}$  (Abszisse) und die zugehörige Teufe in m (Ordinate). Die blaue Kurve zeigt dabei die real gemessenen Daten, während die rote Kurve das Ergebnis einer Simulation darstellt.

gab eine Messunsicherheit von  $\pm 8$  mm. Von der Fortführung der Setzungsmessungen und von weiteren statistischen Auswertungen auf der Grundlage einer größeren Datenmenge wird sich zukünftig auch eine Verbesserung der Messgenauigkeit versprochen. Das hier vorgestellte bohrlochgeophysikali-

sche Messprinzip kann zur Überwachung von Untergrundbewegungen wie Hebungen, Senkungen, Setzungen oder Sackungen in der Umgebung von Kavernen, Deponien, Tagebauen oder im Altbergbau angewendet werden. Der große Vorteil dieses Messprinzips liegt in der teufenabhängigen Erfassung von Untergrundbewegungen. Dabei können

sowohl Bewegungen relativ zwischen den einzelnen Magnetmarken im Untergrund als auch die absoluten Bewegungen bezogen auf einen nivellierten Höhenbezugspunkt erfasst werden. Durch die Kombination von mehreren Setzungspegeln kann die dreidimensionale Verteilung von Bewegungen im Untergrund frühzeitig, bevor sie sich auf der Erdoberfläche bemerkbar machen, erkannt werden.

**Danksagung**

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle ausdrücklich bei den Auftraggebern der Bohrlochmessung-Storkow GmbH bedanken, die die Durchführung von Setzungsmessungen nach dem hier vorgestellten Prinzip ermöglichen und mit den Bearbeitern im regen Austausch stehen, um eine stetige Weiterentwicklung voranzutreiben. Insbesondere mit der Lausitz Energie Bergbau AG (LEAG) einschließlich ihrer Vorgängergesellschaften sowie der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV) wurden bereits über Zeiträume von mehr als 20 Jahren Setzungsmessungen in einer Vielzahl an Pegeln realisiert. Weiterhin gilt der Technischen Universität Berlin Dank, die das hier vorgestellte PTRS in enger Zusammenarbeit mit der Bohrlochmessung-Storkow GmbH maßgeblich mitgestaltet hat.

**Referenzen**

Sofern nicht anders angegeben, ist die Bohrlochmessung-Storkow GmbH Urheber der in diesem Artikel gezeigten Abbildungen.

# Kompetenz, die in die Tiefe geht:

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen und Kamerabefahrungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen.



**BOHRLOCHMESSUNG - STORKOW GmbH**

Schützenstraße 33 • D - 15859 Storkow  
 Tel./Fax: 033678-436 30 / 436 31  
 www.blm-storkow.de • info@blm-storkow.de