



Merkel

Datenunterstützte Prognose der Eigensetzung von Tagebaukippen unter Nutzung der satellitengestützten Radarinterferometrie

Dipl.-Ing. Natalie Merkel¹, natalie.merkel1@mabb.tu-freiberg.de

Prof. Dr.-Ing. Jörg Benndorf¹, joerg.benndorf@mabb.tu-freiberg.de

Dr.-Ing. André John¹, andre.john@mabb.tu-freiberg.de

¹Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Fuchsmühlenweg 9 B, 09599 Freiberg



Benndorf



John

1. Einführung

Seit 1991 wurden bis zum Jahr 2021 in Deutschland etwa 126.000 ha Betriebsfläche des Braunkohlenbergbaus wieder nutzbar gemacht. Insgesamt beträgt die Flächeninanspruchnahme des Braunkohlenbergbaus seit dessen Beginn etwa 3000 km² (Statista, 2022). Mit dem bevorstehenden Ausstieg aus der Braunkohleverstromung werden Großteile dieser Flächen saniert, rekultiviert und verschiedenen Nutzungsarten zugänglich gemacht. Ein wesentlicher Anteil dieser Flächen sind Tagebauinnenkippen. Neben Land- und Forstwirtschaft ist eine bauliche Nachnutzung, insbesondere für Verkehrsstraßen und Energieinfrastruktur, angedacht (z. B. Galiläer und Bennewitz 2008, Schröder u.a. 2021).

Für eine Bebauung von Tagebaukippen ist u.a. das Setzungsverhalten der Tagesoberfläche von Interesse. Dieses wird im Wesentlichen durch den Betrag der Gesamtsetzung sowie den Zeitpunkt des Abklingens der Setzung charakterisiert. Die bauliche Errichtung

von Anlagen erfolgt dabei oftmals bereits vor einem vollständigen Abklingen der Eigensetzung der Kippe.

Setzungserscheinungen auf Tagebaukippen können in Eigensetzung und Lastsetzung unterschieden werden. Lastsetzungen sind Teil lokaler geotechnischer Betrachtungen im Rahmen der Baugrundbewertung und nicht im Fokus dieses Beitrages. Bei der Eigensetzung von Tagebaukippen wirken zwei geomechanische Prozesse. Zum einen ist es die Setzung in Folge von Eigenlast. Diese wird unmittelbar nach der Schüttung wirksam und erfolgt größtenteils in der noch entwässerten Kippe. Die Setzungsbeträge je Zeiteinheit nehmen bis zum vollständigen Abklingen kontinuierlich ab. Ein weiterer Anteil der Setzung wird nach der Einstellung von Entwässerungsmaßnahmen durch den Wiederanstieg von Grundwasser in der Kippe verursacht. Dieser führt zur Erhöhung der Lagerungsdichte des geschütteten Lockergesteins und damit zu Sackungserscheinungen.

Die satellitengestützte Radarinterferometrie liefert Informationen zu vertikalen Bodenbewegungen in hoher raum-zeitlicher Auflösung. Moderne Auswerteverfahren in Kombination mit hochauflösenden Sensoren ermöglichen die Anwendung dieser Monitoringmethode auf Tagebaukippen. Die damit verfügbare Datenbasis erlaubt eine flächenhafte Analyse des Setzungsverhaltens der Oberfläche der Tagebaukippe und erweitert damit die bisherige punktartige Betrachtung unter Nutzung von Höhenfestpunkten. Der vorliegende Beitrag demonstriert, wie aus den räumlich verteilten Zeitreihen eine flächenhafte Modellierung des Zeitsetzungsverhaltens von Tagebaukippen erfolgen kann. Dazu werden klassische Modelle des Zeitsetzungsverlaufes auf die Ergebnisse der satellitengestützten Radarinterferometrie angewandt. Im Ergebnis kann geschlussfolgert werden, dass das hier vorgestellte Verfahren eine nahezu rein datengetriebene Prognose von wichtigen Indikatoren, wie z. B. Zeit bis zum Abklingen der Setzung oder zu erwartende maximale Setzung, erlaubt. Weiterhin liefert das Verfahren eine reiche Datengrundlage zur detaillierten Untersuchung weiterer Einflussfaktoren auf das Setzungsverhalten von Tagebaukippen.

Data-supported forecast of the surface settlement behavior on opencast mine dumps using satellite-based radar interferometry

Satellite-based radar interferometry provides information on vertical ground movements with high spatio-temporal resolution. Modern evaluation methods in combination with high-resolution sensors enable the application of these monitoring methods to opencast mine dumps. The in this way generated database allows an extensive spatio-temporal analysis of the settlement behavior of the surface of opencast mine dumps. This article demonstrates how the spatially distributed time series can be used to model the timely settlement behavior over a large area. For this purpose, classic models of the time-settlement process are applied to the results of satellite-based radar interferometry. As a result, it can be concluded that the method presented here allows an almost purely data-driven forecast of important indicators, such as the time until settlement subsides or the expected maximum settlement. Furthermore, the method provides a rich data basis for a detailed investigation of other influencing factors on the settlement behavior of opencast mine dumps.

Schlagworte

Keywords

Eigensetzung auf Tagebaukippen
settlement on opencast mine dumps

Prognose
forecast

Radarinterferometrie
radar interferometry

Unsicherheit
uncertainty

Neben diesen beiden Prozessen beeinflussen Hebung und das Zusammendrücken des Tagebauliegenden die an der Kippenoberfläche erfassten Bodenbewegungen. Hebungen entstehen durch eine Entlastung infolge des Abtragens des Deckgebirges während der Gewinnungsphase und das Zusammendrücken resultiert aus der Wiederbelastung durch die Tagebauinnenkippe. Dieser Prozess kann auf Kippenflächen, die weit genug vom offenen Tagebauraum entfernt sind, als abgeschlossen betrachtet werden (z. B. FENK 2011, GESS, 2009).

Die Eigensetzung von Tagebaukippen ist bereits viele Jahrzehnte Forschungsgegenstand (z. B. DORSCHNER 1965, NEHRING 1968, KOTHEN und KNUFINKE 1990). Einflussfaktoren auf das Eigensetzungsverhalten sind u.a. Böschungsentfernungsverhältnisse, Liegezeit, Kipptechnologie, Bodenzusammensetzung, verkippte gewachsene Standböschungen, Grundwasserhaushalt, Relief des Liegenden. Deren komplexes Zusammenspiel lässt eine analytische und den praktischen Anforderungen entsprechende Lösung nur sehr schwierig realisieren. Die Anzahl der Parameter eines möglichen analytischen Modells wäre enorm und aus verfügbaren Daten nicht statistisch belastbar abschätzbar. Daher haben sich zur Prognose von Eigensetzungen von Tagebaukippen empirische Lösungen durchgesetzt. Diese basieren auf Auswertungen von in-situ Messungen, die eine zeitliche Extrapolation des Setzungsverhaltens erlauben (z. B. HALLBAUER, 1981).

Dokumentierte Auswertungen basieren bisher weitestgehend auf durch geometrisches Nivellement bestimmte Höhenänderungen an Höhenfestpunkten. Aufgrund der dem Messverfahren innewohnende geringen Festpunktdichte auf Tagebaukippen lassen sich nur lokale Aussagen ableiten. Flächenhafte Aussagen können auf dieser Basis nicht getroffen werden. Ebenfalls ist das Beobachten von Setzungen auf größere Zeitintervalle beschränkt. Eine weiterführende Analyse hinsichtlich der Einflussfaktoren ist auf der Grundlage von Höhenfestpunkten nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich.

Mit der Entwicklung der satellitengestützten Radarinterferometrie steht eine Messmethode zur Verfügung, die flächig und zeitlich sehr dicht Bodenbewegungsdaten erzeugt. In verschiedenen Anwendungen, z. B. dem Europäischen Projekt i2MON, wurde demonstriert, dass speziell der Sentinel 1 – Sensor in Kombination mit dem SBAS-Verfahren, ein flächiges Monitoring auf noch nicht bewachsenen Tagebaukippen ermöglicht (z. B. YANG u.a. 2022).

Es stellt sich die Frage, ob bisher genutzte Auswertungs- und Prognosemodelle zu Setzungen auf Tagebaukippen auch auf satellitengestützte Radardaten angewandt werden können. Die darauffolgende Frage ist die des Informationspotentials, die diese Daten liefern. Können in großer Anzahl und flächenhaft verfügbare Zeitsetzungsinformationen in Verbindung mit statistischen Auswertemethoden zu einem detaillierterem Prognoseansatz führen? In diesem Artikel soll speziell der ersten Frage nachgegangen und das Potential zur Beantwortung der zweiten Frage aufgezeigt werden.

Dazu wird anfangs das in der Praxis etablierte Prognoseverfahren von Eigensetzungen nach Hallbauer

vorgelegt. Die Radarinterferometrie als vergleichsweise neue und bahnbrechende Beobachtungsmethode wird kurz beschrieben und dessen Ergebnisse hinsichtlich der Nutzung zur Beschreibung von Bewegungen auf der Oberfläche von Tagebaukippen charakterisiert. Es folgt eine beispielhafte Anwendung des Verfahrens nach Hallbauer auf radarinterferometrische Daten. Eine flächenhafte Betrachtung der Ergebnisse führt zur Darstellung der Möglichkeit der datengetriebenen Prognose von Kippensetzungen in der zeitlichen Dimension sowie durch Übertragung auf benachbarte, nicht beobachtete Bereiche. Die Ableitung weiterer Untersuchungsschritte schließt den Artikel ab.

2. Prognosemodell für Kippensetzungen nach Hallbauer

Dieser Abschnitt beschreibt den im weiteren Artikel genutzte Prognoseansatz für Eigensetzungen nach Hallbauer (1981).

2.1 Die Zeitsetzungsfunktion

Die Beschreibung des zeitlichen Setzungsverhaltens beruht auf der Auswertung von in-situ Messungen auf der Oberfläche der Tagebaukippe. Diese können aus praktischen Gründen nicht direkt beginnend mit dem Zeitpunkt des Verkippen durchgeführt werden. Nur ein mehr oder weniger großer Teil der Setzungsverlaufes wird beobachtet. Aus diesen sind durch Extrapolation die Parameter Gesamtsetzung und der Zeitpunkt des Abklingens abzuleiten. Dazu ist ein funktionaler Zusammenhang zwischen zeitlichem Verlauf und Setzungsverhalten herzustellen. Eine funktionale Beschreibung des zeitlichen Setzungsverhalten $s(t)$ ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten. Neben hyperbolischen und logarithmischen Funktionen hat sich vor allem der Ansatz unter Nutzung der exponentiellen Funktion durchgesetzt.

$$s(t) = s_{MAX} \cdot (1 - e^{-c \cdot t}) \quad (1)$$

Dabei beschreiben die Parameter s_{max} den maximalen Betrag an Eigensetzung und c beschreibt den zeitlichen Verlauf.

Abbildung 1 stellt eine solche Zeitsetzungsfunktion dar. Dabei ist zu beachten, dass der Ursprung der Funktion zugrundeliegenden Koordinatensystems mit dem Beginn der Beobachtung zusammenfällt. Der daraus abgeleitete Parameter $s_{max(B)}$ entspricht dem maximalen Setzungsbetrag bezogen auf den Beobachtungsbeginn. Die Gesamtsetzung s_{max} ergibt sich aus der Summe von $s_{max(B)}$ und der anfänglichen Setzung s_A , die sich zwischen dem Verkippszeitpunkt und dem Beobachtungsbeginn eingestellt hat. Dieser Zeitraum wird auch als Liegezeit bezeichnet.

Eine aus den Beobachtungsdaten abgeleitete Zeitsetzungsfunktion nach (1) hat demnach praktisch die Form

$$s(t) = s_{MAX(B)} \cdot (1 - e^{-c \cdot t}). \quad (2)$$

Daraus ist S_A nach der Beziehung

$$S_A = S_{MAX(B)} \cdot (1 - e^{-c \cdot t_0}) \quad (3)$$

mit der mittleren Liegezeit

$$t_0 = \text{Verkippszeitpunkt} - \text{Beobachtungsbeginn} \quad (4)$$

abzuleiten. Bei mehreren Kippscheiben wird nach Hallbauer vorgeschlagen, eine mächtigkeitsgewichtete mittlere Liegezeit anzunehmen.

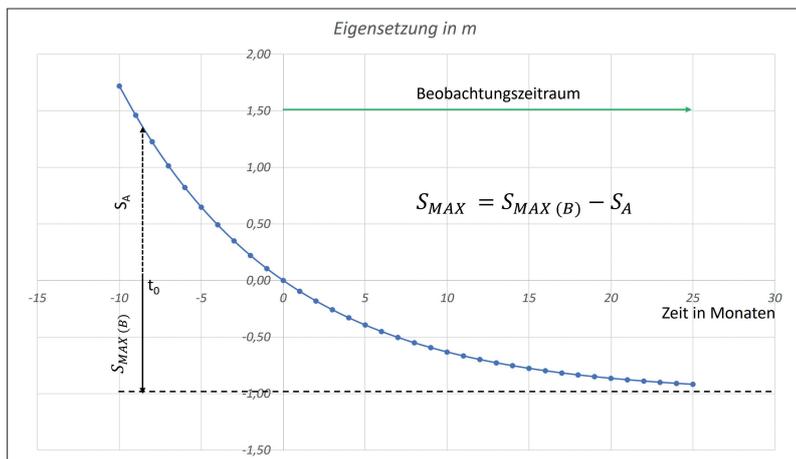


Abb. 1: Exponentielle Zeitsetzungsfunktion zur Charakterisierung des zeitlichen Eigensetzungsverhaltens

2.2 Parameterschätzung der Zeitsetzungsfunktion durch die Methode der Kleinsten Quadrate

Die Parameter der Zeitsetzungsfunktion sind unter Nutzung der Methode der Kleinsten Quadrate (z. B. Niemeier, 2008) ortsspezifisch aus den beobachteten Zeitreihen je Messpunkt abzuleiten.

Der zu schätzenden Parametervektor enthält die beobachtete Maximalsetzung $s_{max(B)}$ und den Zeitparameter c .

$$\mathbf{x}^T = [s_{max(B)}, c] \quad (5)$$

Nach Anwendung der Methode der Kleinsten Quadrate berechnet sich der Parametervektor gemäß

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (6)$$

Die Elemente der Spalten eins und zwei der Designmatrix A ergeben sich aus

$$a_{1,i} = \frac{ds}{ds_{max(B)}} = 1 - e^{-c \cdot t_i} \quad \text{und} \quad (7)$$

$$a_{2,i} = \frac{ds}{dc} = s_{max(B)} \cdot t_i \cdot e^{-c \cdot t_i} \quad (8)$$

Dabei beschreibt der Index i die Zeile korrespondierend zu dem jeweiligen Messwert in der Zeitreihe. Der Vektor der gekürzten Beobachtungen l ergibt sich aus

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}_0 \quad (9)$$

Dazu sind unter Nutzung von Näherungsparametern X_0 gerechnete Näherungsbeobachtungen L_0 zu ermitteln und die tatsächlichen Beobachtungen L um diese zu reduzieren. Zur Bestimmung des finalen ausgeglichenen Parametervektors ist der Ergebnisvektor x zu den Näherungsparametern X_0

Zur Abschätzung der Unsicherheit der geschätzten Parameter wird die empirische Kovarianzmatrix herangezogen. Diese ergibt sich aus dem Produkt der empirischen Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 mit der Kofaktorenmatrix der ausgeglichenen Parameter Q_{xx}

$$\mathbf{C}_{xx} = s_0^2 \mathbf{Q}_{xx} \quad (10)$$

mit

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n-1} \quad (11)$$

und

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} q_{smax,smax} & q_{smax,c} \\ q_{c,smax} & q_{c,c} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Dabei ist \mathbf{v} der Vektor der Verbesserungen zwischen Messwerten und ausgeglichenen Beobachtungen (angepasstes Modell). Gleichung (11) gilt unter der Annahme gleichgenauer Beobachtungen. Die Unsicherheit der geschätzten Parameter beziehen sich auf die Elemente der Hauptdiagonale der empirischen Kovarianzmatrix.

2.3 Abgeleitete Vergleichsparameter

Zum Vergleich des zeitlichen Setzungsverhaltens im Sinne der größtmöglichen Allgemeingültigkeit wurden durch Hallbauer Vergleichsparameter eingeführt. Dazu empfiehlt sich zum einen den absoluten Betrag der Gesamtsetzung s_{max} durch die Mächtigkeit der betrachteten Kippscheibe M zu standardisieren. Das führt zur Deformation oder relative Gesamtsetzung

$$\varepsilon = \frac{s_{max}}{M} \quad (13)$$

Weiterhin wird ein Zeitwert eingeführt, zu welchem $x\%$ der Gesamtsetzung oder der beobachteten Setzung eingetreten sind. Dieser ergibt sich aus

$$t_x = \frac{\ln(1 - \frac{x}{100})}{c} \quad (14)$$

Typische Werte für x sind 95% oder 99%. Je nach Bezugszeitpunkt, Zeitpunkt der Verkipfung oder Zeitpunkt des Beobachtungsbeginn bezieht sich auf s_{max} oder $s_{max(B)}$.

2.4 Praktische Rahmenbedingungen

Nach Hallbauer soll der Beobachtungszeitraum von Messpunkten mindestens zwei Jahre betragen, um die Zeitsetzungskurve hinreichend robust schätzen zu können und somit eine statistisch belastbare Extrapolation zu ermöglichen. Weiterhin sollte die Lage der Messpunkte in Bezug auf die Lage zu Kippenböschungskanten und Übergangsbereichen, zwischen gewachsenem und verkipptem Untergrund, kritisch betrachtet werden.

3. Satellitengestützte Radarinterferometrie

Die Methode der satellitengestützten Radarinterferometrie ist im Geomonitoring fest etabliert. Seit mehr als einer Dekade wird diese erfolgreich eingesetzt, um Bodenbewegungen großflächig und in zeitlich hoher Auflösung zu detektieren und zu charakterisieren (z. B. Hansen 2001, Wegmüller u.a. 2009, Grzempowski u.a. 2020). Sie ist sehr gut geeignet, großflächige und vergleichsweise langsame kontinuierliche Bodenbewegungen und Verformungen in Bereichen bergbaulicher Nutzung zu überwachen. So liefert beispielsweise die PSI-Auswertung eines Stapels von Radar-Satellitenbildern räumlich dicht angeordnete Zeitreihen in hoher Auflösung. Detektierbare Bewegungsraten liegen im Bereich von 1mm/a (z. B. John, 2021). Die Notwendigkeit von natürlichen und künstlichen Rückstreuern macht die Anwendung der PSI-Auswertung besonders geeignet für bebauten Gebiete mit Dächern, Asphaltflächen oder Ähnlichem. Raue Kippenoberflächen scheinen zunächst weniger geeignet. In verschiedenen dokumentierten Anwendungen (Yang u.a. 2022) hat sich jedoch gezeigt, dass speziell der Sentinel 1 – Sensor in Kombination mit dem SBAS Auswerteverfahren auf diesen Flächen belastbare Daten liefert. Neben den hochauflösenden Sensoren bieten auch neue Auswerteverfahren eine höhere Punktdichte. So werden bei der Methode SqueeSAR (Ferretti u.a. 2011) nicht nur diskrete Rückstreuer (Permanent Scatterers PS), sondern auch verteilte Streuer (Distributed Scatterers, DS) erfasst. Durch Erfassung von PS und DS erhöht sich die Zahl erfasster Elemente erheblich.

Die Kombination von hochauflösenden Sensoren mit diesen modernen Auswerteverfahren erlauben es, auf Tagebaukippen eine raum-zeitlich hochaufgelöste Datenbasis über vertikale aber auch horizontale (beschränkt auf Ost-West-Richtung) Bodenbewegungskomponenten zu generieren. Dabei ist einschränkend zu bemerken, dass vorhandene horizontale NS-Bewegungskomponenten die Ergebnisse der Radarauswertung systematisch verfälschen können (Yin und Busch 2018). Die folgenden Betrachtungen erfolgen unter der Annahme, dass das nicht der Fall ist.

4. Erweiterung der Methode nach Hallbauer durch InSAR-Daten

Hallbauers Datengrundlage in seiner Dissertation aus dem Jahr 1981 umfasst vergleichsweise wenige durch geometrisches Nivellement erfasste Höhenfestpunkte, die auch zeitlich in vergleichsweise großen Intervallen gemessen wurde. Dahingegen bietet die satellitengestützte Radarinterferometrie heute eine wesentlich informationsreichere Datenbasis. In Rasterabständen von wenigen Metern können Bodenbewegungsdaten erfasst werden. Die Möglichkeiten, die sich daraus ergeben, sollen in den folgenden Betrachtungen untersucht werden. Es lassen sich die Annahmen formulieren, dass

- sich das Zeitsetzungsverhalten auf Tagebaukippen flächenhaft charakterisieren lässt,
- darauf aufbauend lokal differenziertere und zeitlich präzisere Prognosen hinsichtlich Gesamtsetzung,

Restsetzung und Zeitraum bis zum Abklingen der Setzungen an der Kippenoberfläche ableiten lassen,

- eine Verknüpfung der flächenhaften Daten mit Informationen über Geometrie und Kippenaufbau, Zusammensetzung der Kippe aus Bodengruppen, Verkippungstechnologie, etc. weitere Zusammenhänge formulieren lässt, die das Prozessverständnis über das Setzungsverhalten und ultimativ auch Prognosemodelle verbessern lassen.

Erste Untersuchungen und Auswertungen dazu werden im Folgenden dargestellt.

5. Anwendung der Methode auf eine Tagebaukippe im Mitteldeutschen Revier

Das in der Untersuchung betrachtete Fallbeispiel ist ein Teil einer Innenkippe in Mitteldeutschland und hat eine Flächengröße von ca. 900 m x 900 m. Die Verkippung des Bereiches erfolgte im Zeitraum 2013 bis 2014. Für die Kippe existiert ein detailliertes Kippenmodell, welches in einer Auflösung von 5 x 5 x 5 m die Zusammensetzung des Bodens charakterisiert und mit einem Zeitstempel der Verkippung versehen ist (Knipfer und Kreßner 2022, Benndorf u.a. 2022). Generell ist das gekippte Material als Mischboden zu bezeichnen, welches unterschiedliche Anteile an bindigen und rolligen Lockergestein enthält.

5.1 Datenbasis

Für das Studiengebiet liegen Daten einer hochaufgelösten radarinterferometrischen Auswertung vor. Dabei kann auf einem Datenbestand mit einer räumlichen Auflösung von ca. 15 m x 15 m und zeitlichen Auflösung von 3 Tagen zurückgegriffen werden. Letztere resultiert aus einer kombinierten Auswertung von Satelliten des Ascending und Descending Orbit. Die in dieser Arbeit genutzte Auswertung betrachtet den Zeitraum 01/2017 bis 12/2019. Der Datensatz wurde durch Airbus Defence and Space GmbH, Postdam für die MIBRAG mbH erzeugt und im Rahmen des F&E Projektes TRIM4PostMining der TU Bergakademie Freiberg zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt. Sämtliche Darstellungen basieren auf diesen Daten (© Airbus Defence and Space GmbH, Postdam, Germany).

5.2 Ermittlung der Parameter der Zeitsetzungsfunktion

Anhand eines ausgewählten DS-Punktes wird die Ermittlung der Vergleichsparameter dargestellt. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der radarinterferometrischen Höhendaten sowie die Modellanpassung. Der DS-Punkt befindet sich im Inneren der Kippe mit einer Kippenmächtigkeit von etwa 35m. Die Anpassung des Modells basiert auf Daten über einen Zeitraum von drei Jahren, beginnend mit dem 01. Januar 2017. Die Schätzung der Parameter der exponentiellen Setzungsfunktion erfolgte unter Nutzung der Methode der Kleinsten Quadrate gemäß Abschnitt 2.2.

Abb. 2: Beispiel zur Anpassung einer exponentiellen Setzungs-funktionen an radar-interferometrische Daten (© Airbus Defence and Space GmbH, Potsdam, Germany)

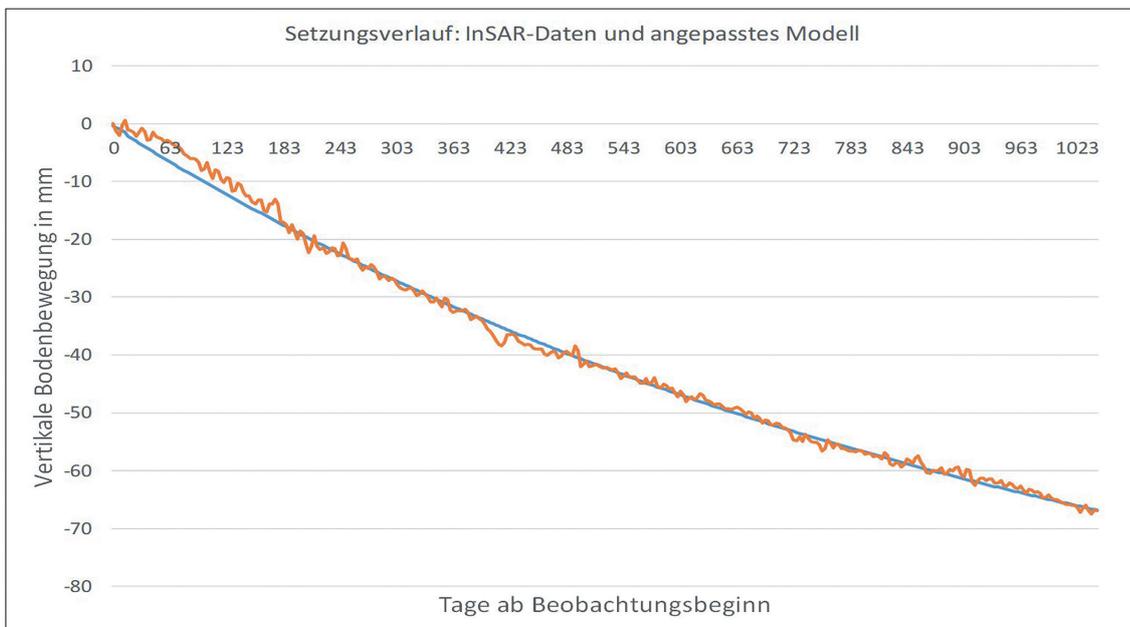


Tabelle 1: Zusammenfassung der ermittelten Vergleichsparameter für den betrachteten DS-Punkt

	$S_{max}(B)$ in mm	Kippzeitpunkt	S_A in mm	S_{max} in mm	Mächtigkeit in m	ϵ in %	c in 1/Tage	t_{95} in Monate
DS-Punkt	-102	18.02.2014	-194	-296	35	0,86	0,0010	99

Tabelle 1 fasst die, nach dem in Abschnitt 2 erläuterten Vorgehen, ermittelten Parameter zusammen. Im Vergleich zu den Erfahrungen von Hallbauer erscheinen die Werte zu Deformation und zeitlichem Verhalten plausibel. Für die Dammkippe in Frankleben ermittelte er beispielsweise Deformationen von etwa 1% (Hallbauer, 1981).

Die Anwendung des vorgestellten Verfahrens auf alle DS-Punkte erlaubt eine flächenhafte Betrachtung der Parameter der Setzungs-funktion. Die Abbildungen 3 bis 5 stellen die räumliche Verteilung der Parameter $s_{max(B)}$, s_{max} und c dar.

Abbildung 3 zeigt die aus den DS Daten abgeleitete beobachtbare Maximalsetzung ab Beobachtungsbeginn. Die Werte decken einen Wertebereich von 0 mm bis -400 mm ab. Die flächige Verteilung der Werte ist als plausibel einzuschätzen. Im Westen und Norden stützt sich die Kippe an gewachsenen Boden an, die Kippmächtigkeit nimmt in diesen Bereichen in Richtung Süden und Osten hin zu. Auffällig ist ein Bereich sehr hoher beobachtbarer Setzungen im Süden. Diesen gilt es nach Hinzunahme weiterer Informationen zum Kippenaufbau näher zu analysieren.

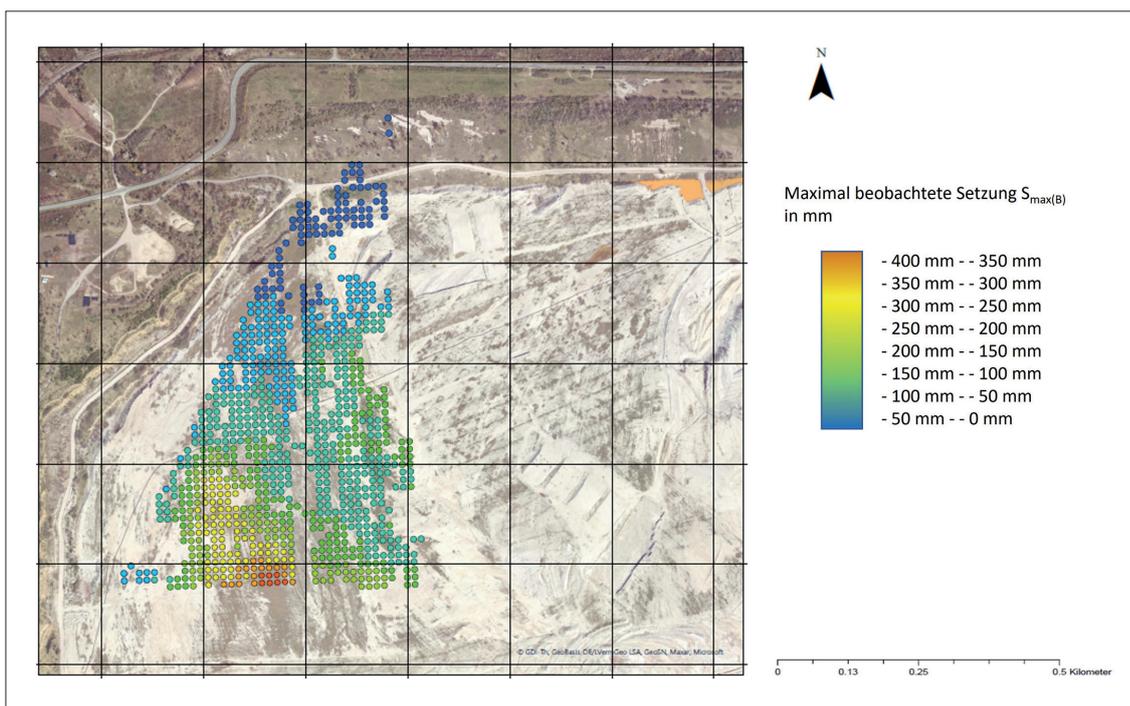


Abb. 3: Flächige Verteilung des aus den DS-Reihen abgeleiteten Parameters $s_{max(B)}$

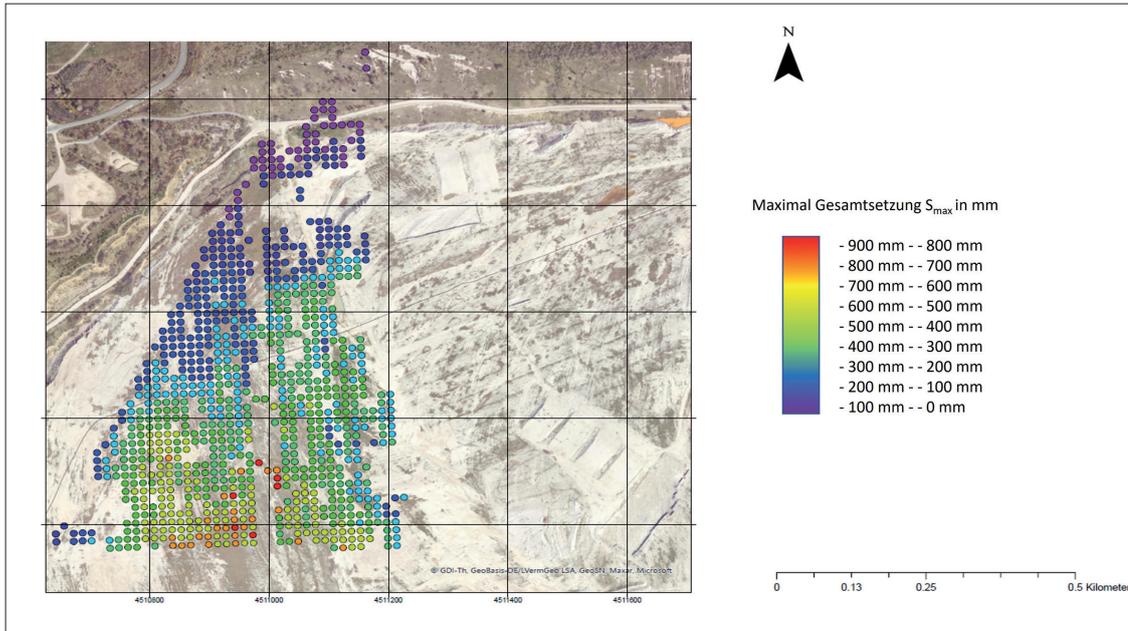


Abb. 4: Flächige Verteilung des aus den DS-Reihen abgeleiteten Parameters s_{max}

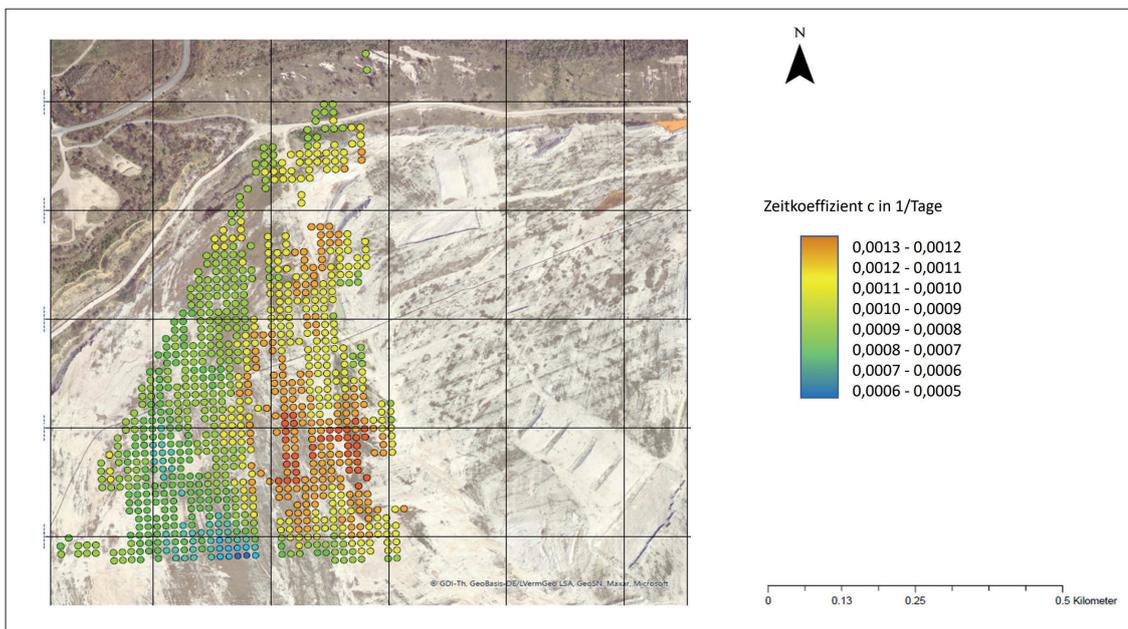


Abb. 5: Flächige Verteilung des aus den DS-Reihen abgeleiteten Parameters c

Abbildung 4 zeigt die aus den DS Daten abgeleitete Maximalsetzung ab Kippzeitpunkt. Der Wertebereich reicht von 0 mm bis -900 mm. Dazu wurden die im Kippenmodell dokumentierte Information der Kippzeitpunkte hinzugenommen. Im mittleren südlichen Bereich sind einige DS-Punkte mit einer sehr hohen Gesamtsetzung zu erkennen, die sich nicht in das sonst eher glatt verlaufende räumliche Muster einpassen. Diese sind durch von der Umgebung abweichende Kippzeitpunkte bedingt und können lokalen Stellen zugeordnet werden, an welchen beispielsweise im Nachgang Erdbauarbeiten an der Kippe erfolgten. Unabhängig davon wird die in Abbildung 3 erkannte räumliche Struktur des Setzungsverhaltens bestätigt, die absoluten Beträge sind jedoch verschieden.

Die flächige Verteilung des in Abbildung 5 dargestellten Zeitfaktor c zeigt im Vergleich zum Setzungsbetrag ein differenziertes Verhalten. Hier ist kein direkter Zusammenhang zur Kippenmächtigkeit erkennbar. Es sind Bereiche erkennbar (südöstlicher Bereich),

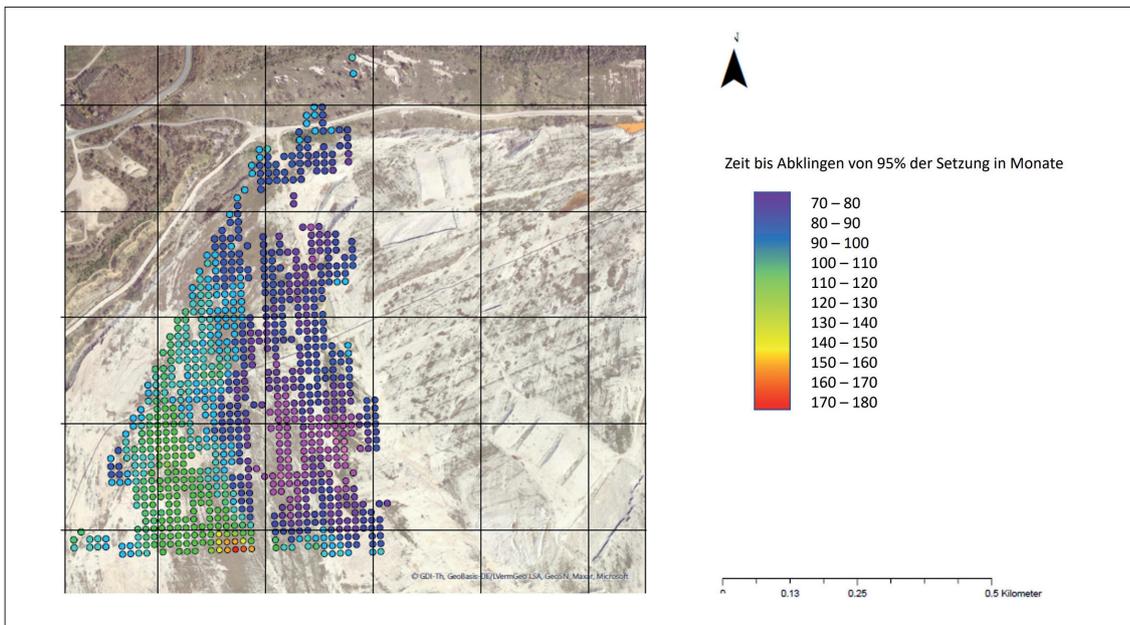
in dem die Setzung schneller erfolgt als anderswo. Auch diese Bereich gilt es unter Hinzunahme weiterer Kippeninformationen, insbesondere die Materialzusammensetzung, näher zu analysieren.

6. Prognose durch Anwendung des ermittelten Setzungsmodells

6.1 Prognose des zukünftigen Setzungsverhalten im Beobachtungsgebiet

Mit den im vorherigen Abschnitt abgeleiteten Parameter des Zeitsetzungsverhaltens ist der Prozess nicht nur für den Beobachtungszeitraum beschrieben. Unter der Annahme, dass sich das Bewegungsverhalten nicht signifikant ändert, kann das Modell zur zeitlichen Extrapolation an den Beobachtungspunkten genutzt werden. Abweichungen davon können beispielsweise durch einen Anstieg des Grundwassers hervorgerufen werden. Damit verbundene Entlastungs- und Sackungs-

Abb. 6: Zeitpunkt bis zum Erreichen von 95% der Gesamtsetzung



erscheinungen könnten das aus den Daten abgeleitete Bewegungsmuster signifikant stören. Derartige Effekte werden im weiteren Artikel nicht betrachtet.

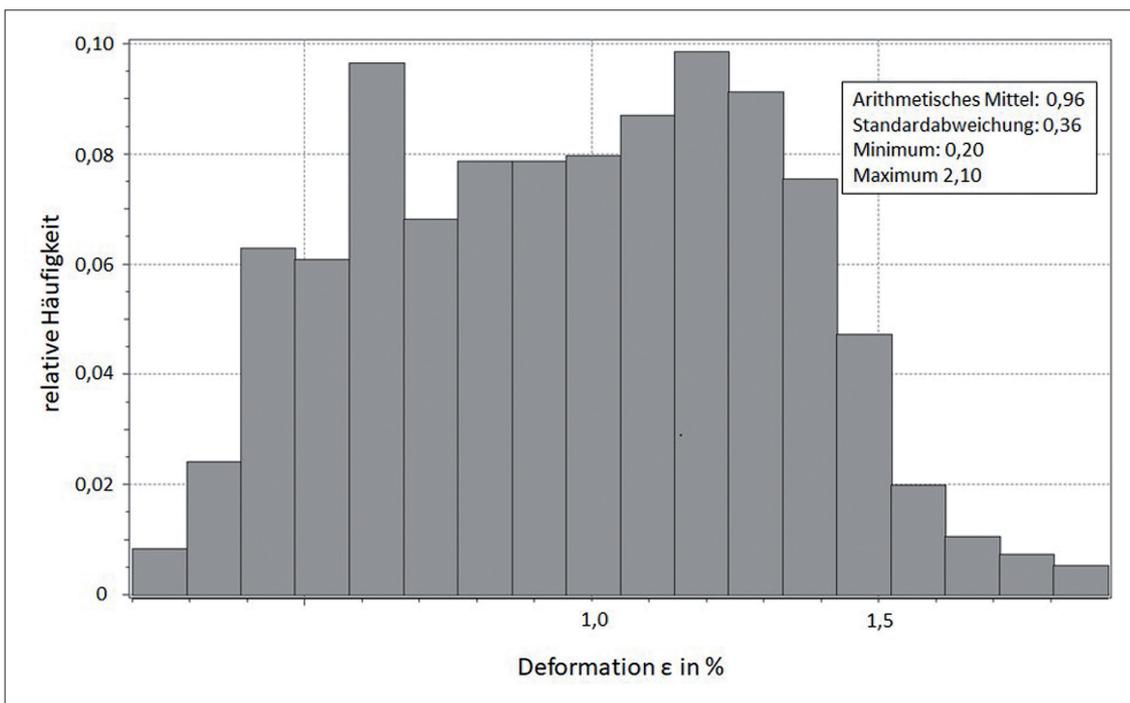
Die Zeitsetzungsfunktion in Kombination mit Gleichung (14) erlaubt die Abschätzung der Zeit, bis ein zu definierender Anteil der Gesamtsetzung abgeklungen ist. Ein typischer Betrag ist 95%. Abbildung 6 zeigt diese Prognose für den betrachteten Kippenabschnitt. Auch hier ist ein differenziertes Bild zu erkennen. Im östlichen Teil der Kippe beträgt die Restsetzungszeit etwa 70 bis 100 Monate, was ca. 6 bis 8 Jahren entspricht. Im westlichen und südlichen Teil beträgt die Zeit bis zum Abklingen 100 bis 170 Monate, was etwa 8 bis 14 Jahren entspricht. Der Unterschied im Verhalten ist in einer weiterführenden Analyse unter Hinzunahme der weiteren Informationen über Geometrie und Materialaufbau der Kippe zu untersuchen.

Weitere modellgestützte Prognosen sind ohne weiteres möglich, beispielsweise eine Prognose von Restsetzungen oder eingetretenen Setzungen für einen beliebigen Zeitpunkt oder der Abschätzung des Zeitpunktes, bis ein absoluter Restsetzungsbetrag verbleibt, z. B. 50 mm.

6.2 Prognose des Setzungsverhaltens außerhalb des Beobachtungsgebietes

Zur Übertragung der Erkenntnisse aus dem betrachteten Abschnitt der Kippe heraus auf andere Bereiche können die geschätzten Parameter herangezogen werden. Dazu eignen sich der Zeitkoeffizient c und die Deformation ϵ . Letztere setzt die Gesamtsetzung in einen Bezug zur Kippenmächtigkeit und kann als relative Senkung interpretiert werden. Damit können

Abb. 7: Häufigkeitsverteilung der Deformation im Untersuchungsgebiet



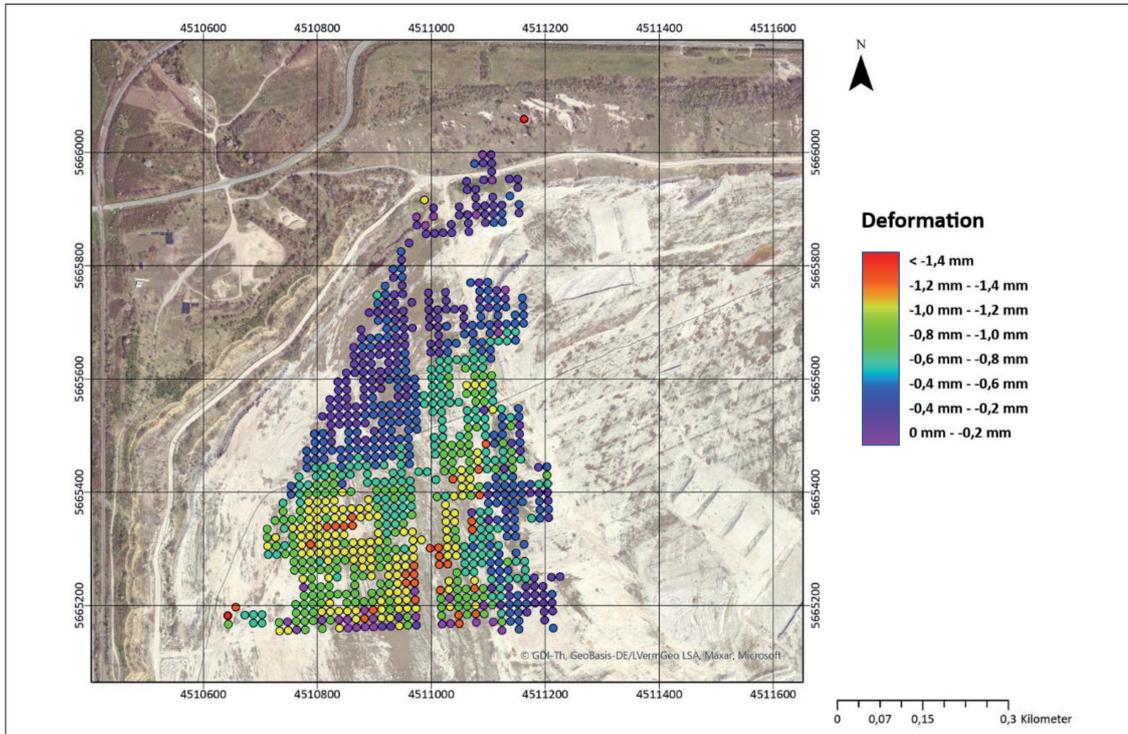


Abb. 8: Räumliche Verteilung der Deformation im Untersuchungsgebiet

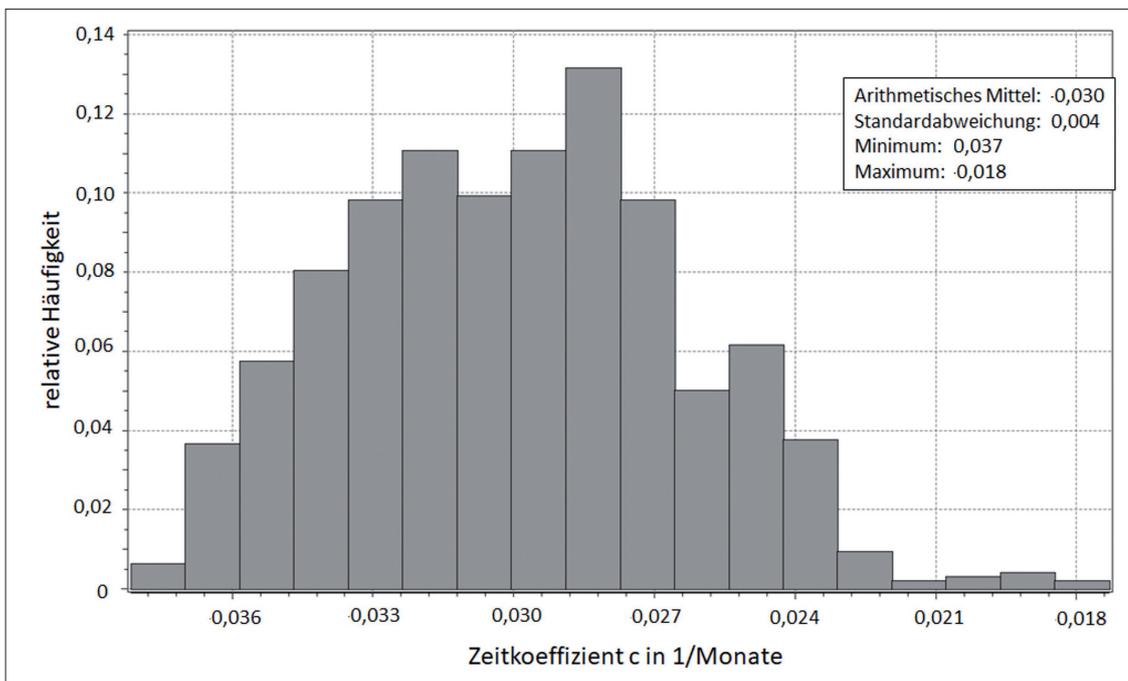


Abb. 9: Häufigkeitsverteilung des Zeitkoeffizienten c in 1/Monate im Untersuchungsgebiet

Abschätzungen zur Gesamtsetzung auf Bereiche der Kippe übertragen werden, für die die Mächtigkeit bekannt ist.

Abbildung 7 stellt die Häufigkeitsverteilung der aus dem DS-Zeitreihen abgeleiteten Deformationskennwerte über den betrachteten Kippenabschnitt dar. Das arithmetische Mittel der Deformation ist 0,96 % mit einer Standardabweichung von +/- 0,34 %. Ohne ein Hinzuziehen zusätzlicher Informationen und unter Annahme, dass sich Kipptechnologie und Zusammensetzung des Kippmaterials nicht wesentlich ändern, kann dieser Wert inkl. der Unsicherheit auf benachbarte Bereiche übertragen werden. Damit ist eine Prognose der Gesamtsetzung im Rahmen der Standardabweichung möglich.

Bei Betrachtung der Abbildung 8, welche die räumliche Verteilung der Deformationskennwerte darstellt, werden systematische Zusammenhänge deutlich. Diese deuten auf weitere nicht-zufällige Einflussfaktoren hin, die in den bisherigen Betrachtungen nicht beachtet wurden. Es ist anzunehmen, dass beispielsweise die Zusammensetzung der Kippe aus Bodenarten, lokale hydrologische Besonderheiten oder die Nähe zur Böschungsoberkante der Kippe (das Böschungsendverhältnis BEV) lokal die Deformation beeinträchtigen können. Eine detaillierte Untersuchung zu diesen Faktoren ist nicht Bestandteil dieses Beitrages, jedoch aktueller Forschungsgegenstand.

Abbildung 9 stellt die Häufigkeitsverteilung des Zeitkoeffizienten c dar. Mit einem Mittelwert von

0,03 1/Monat und einer Standardabweichung von +/- 0,004 1/Monat verhält sich dieser Koeffizient wenig variabel. Diese Information kann auf technologisch vergleichbare Bereiche der Kippe übertragen werden.

7. Genauigkeitsbetrachtung

7.1 Güte der Modellanpassung

Zur Beurteilung der Güte der Anpassung des Modells an die Messdaten eignet sich das Bestimmtheitsmaß B.

$$B = \frac{\text{Varianz (Messdaten)} - \text{Varianz (Residuen)}}{\text{Varianz (Messdaten)}} \quad (15)$$

Dieses beschreibt den Anteil der Varianz der Daten, der durch das Modell beschrieben wird. Mit einem Wert von B=0,97 für den in Abbildung 2 und Tabelle 1 betrachtete DS-Punkt kann das Modell im Wertebereich der Messdaten als sehr gut angepasst bewertet werden. Die Residuen, d.h. die Differenz zwischen Modell und Messwert sind für den betrachteten Punkte in Abbildung 10 dargestellt. Tabelle 2 fasst die Statistik der Residuen zusammen. Hinsichtlich der Größenordnung der in Tabelle 2 dargestellten Wert ist festzustellen, dass die Abweichungen für praktische Fragestellungen zum Bauen auf Tagebaukippen vernachlässigbar sind.

Abb. 10: Residuen zwischen Modell- und Beobachtungen für zwei ausgewählte DS-Punkte.

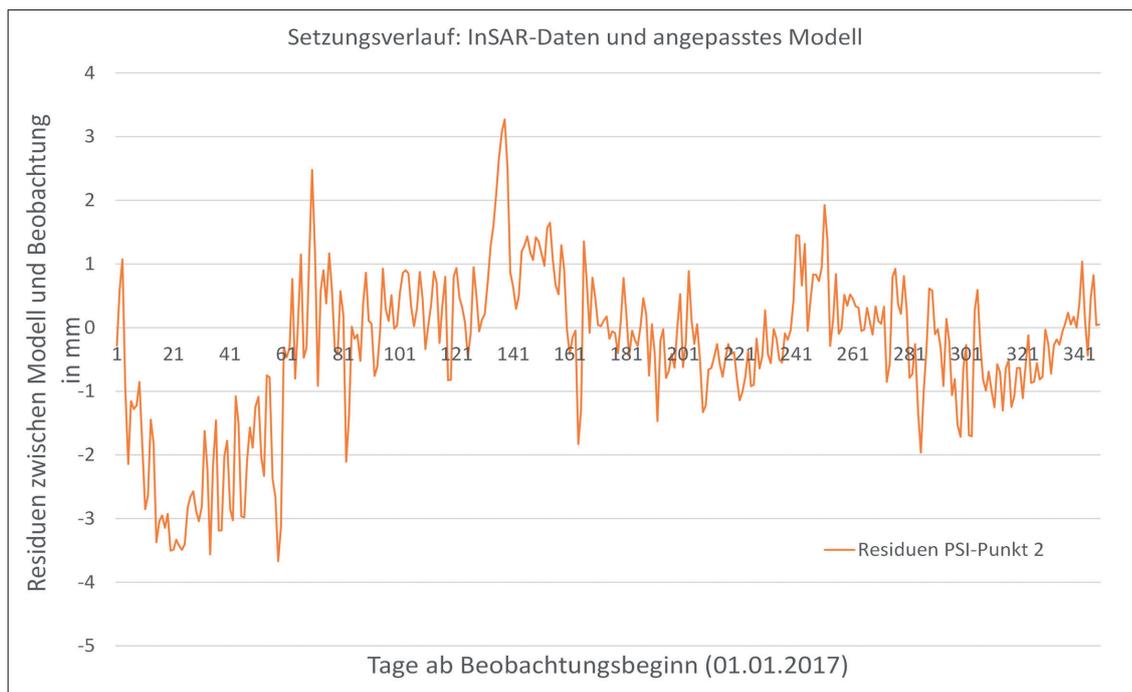
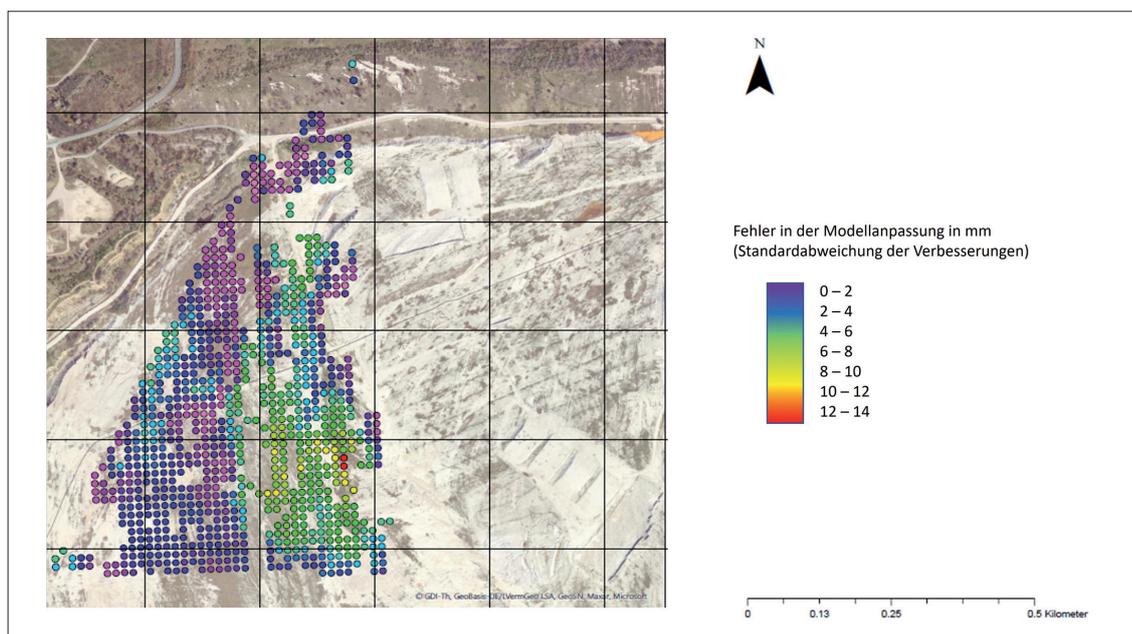


Tabelle 2: Abweichungen zwischen Modell und Beobachtungen.

	Minimale Abweichung	Maximale Abweichung	Mittelwert der Abweichungen	Standardabweichung der Abweichungen
DS-Punkt	-3,7 mm	3,3 mm	0,3 mm	+/- 1,2 mm

Abb. 11: Räumliche Verteilung des Fehlers in der Modellanpassung



Auffällig ist hingegen, dass die in Abbildung 10 dargestellten Abweichungen nicht rein zufällig verlaufen, sondern eine zeitliche Autokorrelation aufweisen. Über längere Perioden treten gleichgerichtete Residuen auf. Diese Erscheinungen können auf temporäre Beeinflussungen sowohl der InSAR-Daten, z. B. durch atmosphärische Prozesse, als auch der Setzungen an sich erklärt werden. Letzteres könnten beispielsweise Hebungerscheinungen durch Frost oder ein beschleunigtes Setzungserscheinen aufgrund von Infiltration von langanhaltenden Niederschlägen in die Kippenoberfläche hervorgerufen werden. Auch wenn die Aufklärung dieser Phänomene wissenschaftlich interessant erscheint, ist sie aufgrund der sehr geringen Bewegungsbeträge von keiner praktischen Bedeutung und soll hier nicht weiter betrachtet werden.

Abbildung 11 zeigt die Standardabweichung der Anpassung für alle betrachteten Punkte. Zum Großteil

befinden diese sich zwischen 0 mm und 4 mm und sind als sehr gering einzuschätzen. Im Südosten des betrachteten Kippensegmentes ist ein Bereich mittleren Abweichungen bis zu 14 mm erkennbar. Auch diese Größenordnung ist im Sinne einer Prognosegenauigkeit für Kippensetzungen als gering einzuschätzen. Es steht jedoch die Frage, welche Bedingungen derartige Abweichungen hervorruft. Abbildung 12 zeigt beispielhaft eine Zeitreihe aus dem Bereich mit hohen Abweichungen. Im Gegensatz zu Abbildung 2 ist der Verlauf der Zeitreihe durch ein Abweichen der Form von der genutzten Zeitsetzungskurve charakterisiert, insbesondere in den ersten 500 Tagen. Während dieser Zeit zeigt die Zeitreihe ein für den modellierten Prozess nicht charakteristisches Verhalten. Auf eine mögliche Erklärung dieses Phänomens wird hier in diesem Artikel nicht weiter eingegangen. Dazu sind aktuell weiterführende Untersuchungen im Gange.

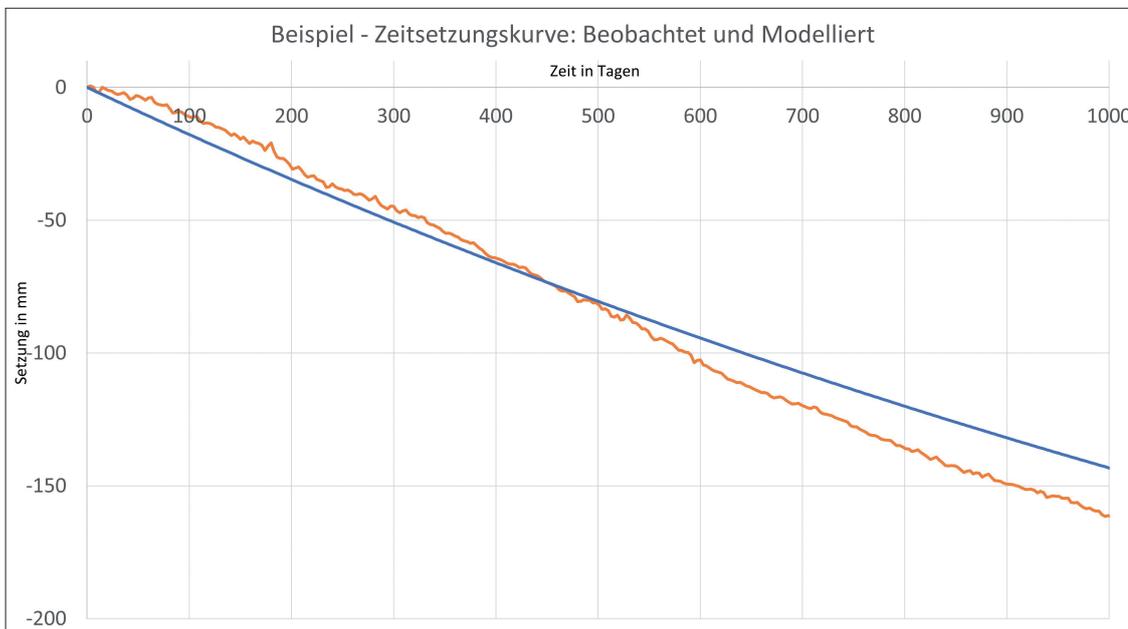


Abb. 12: Beispiel einer nicht optimal angepassten Setzungskurve

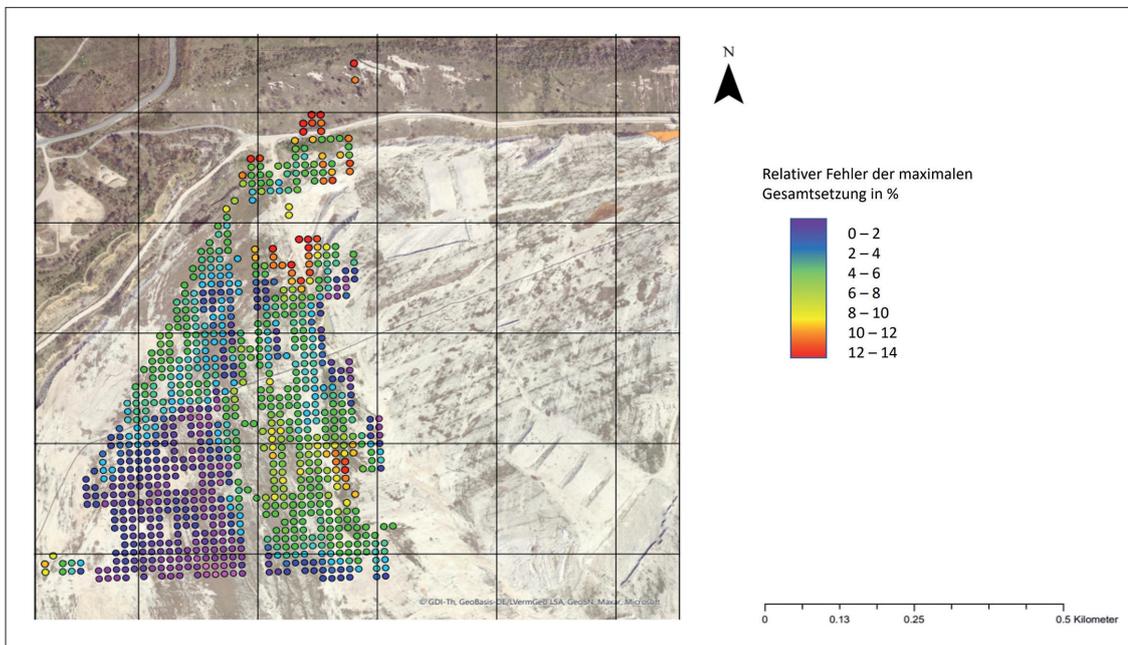
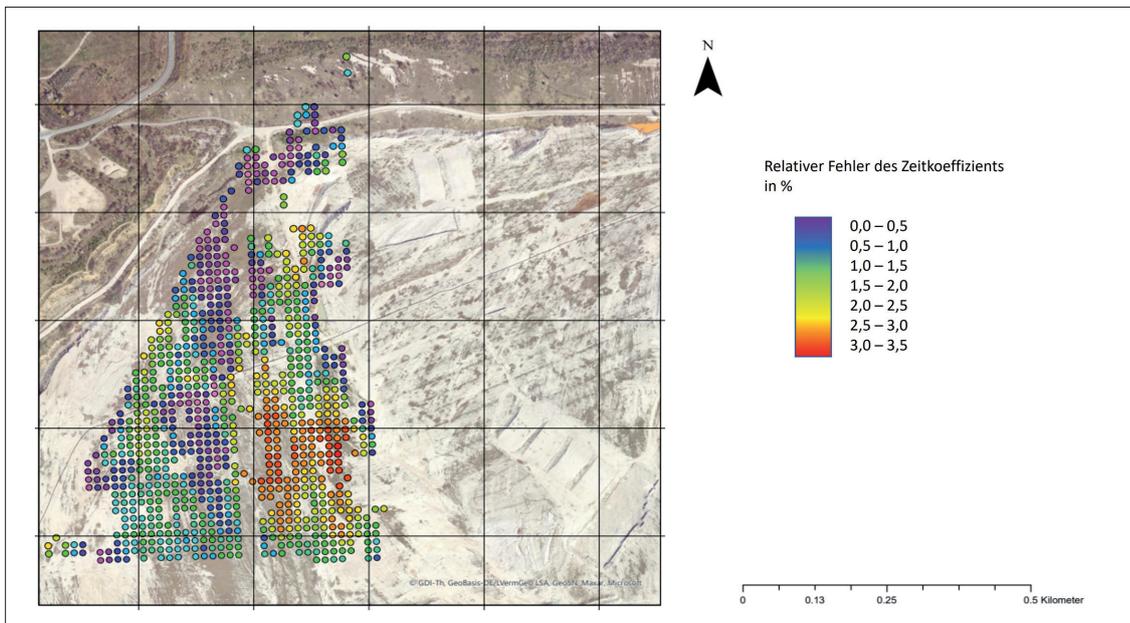


Abb. 13: Flächige Verteilung des relativen Fehlers der Gesamtsetzung

Abb. 14: Flächige Verteilung des relativen Fehlers des Zeitkoeffizients



7.2 Unsicherheiten in der Prognose

Neben dem absoluten Fehler der Anpassungen können die Unsicherheiten in den geschätzten Parameter „Maximale Setzung“ und „Zeitkoeffizient“ ermittelt werden. Dazu dient die Standardabweichung der ausgeglichenen Parameter. Werden diese Unsicherheiten auf den absoluten Wert der maximalen Setzung und des Zeitkoeffizients je Beobachtungspunkt bezogen, ergibt sich der relative Fehler. Die Abbildungen 13 und 14 stellen diese flächenhaft dar. Für die maximale Setzung sind relative Fehler von 0,0% bis 15,0% zu erkennen. Für den Zeitkoeffizient bewegt sich der relative Fehler zwischen 0,0% und 3,5%.

Die einfache Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes erlaubt eine Abschätzung der Unsicherheit der Setzung zu einem beliebigen Zeitpunkt.

$$u_{s(t)} = \sqrt{((1 - e^{-ct}) \cdot u_{s(max)})^2 + ((s_{max} \cdot t \cdot e^{-ct}) \cdot u_c)^2}$$

(16)

Formel 16, angewandt auf einen beobachteten DS-Punkt, liefert Aussagen zur Unsicherheit der Prognose des zukünftigen Setzungsverlauf an diesem Ort. Bei guter Modellanpassung ist diese Unsicherheit vergleichsweise klein. Abbildung 15 zeigt im linken Teil den prognostizierten Verlauf und die Unsicherheit für den bereits betrachteten DS-Punkt. Da in die Unsicherheitsbetrachtung mit der Standardabweichung der Gewichtseinheit auch die Güte der Modellanpassung eingeht, wird das in Abschnitt 7.1 beschriebene Phänomen, d.h. ein Abweichen der beobachteten Zeitreihe vom charakteristischen Verlauf des Setzungsverhalten, in der Unsicherheitsquantifizierung mitbewertet.

Wird Formel 16 auf Bereiche der Tagebaukippe angewandt, die nicht beobachtet wurden, sind als Unsicherheiten die in Abschnitt 6.2 genannten Werte für $s_{max} = (0,96 \% \pm 0,34 \%) M$ und $c = (-0,03 \pm 0,004) 1/\text{Monat}$ anzusetzen. Der rechte Teil in Abbildung 15 stellt diesen Fall dar. Es ist zu betonen, dass diese Unsicherheit sehr konservativ ist und in Bereichen gilt, die weit entfernt von den Beobachtungspunkten liegen.

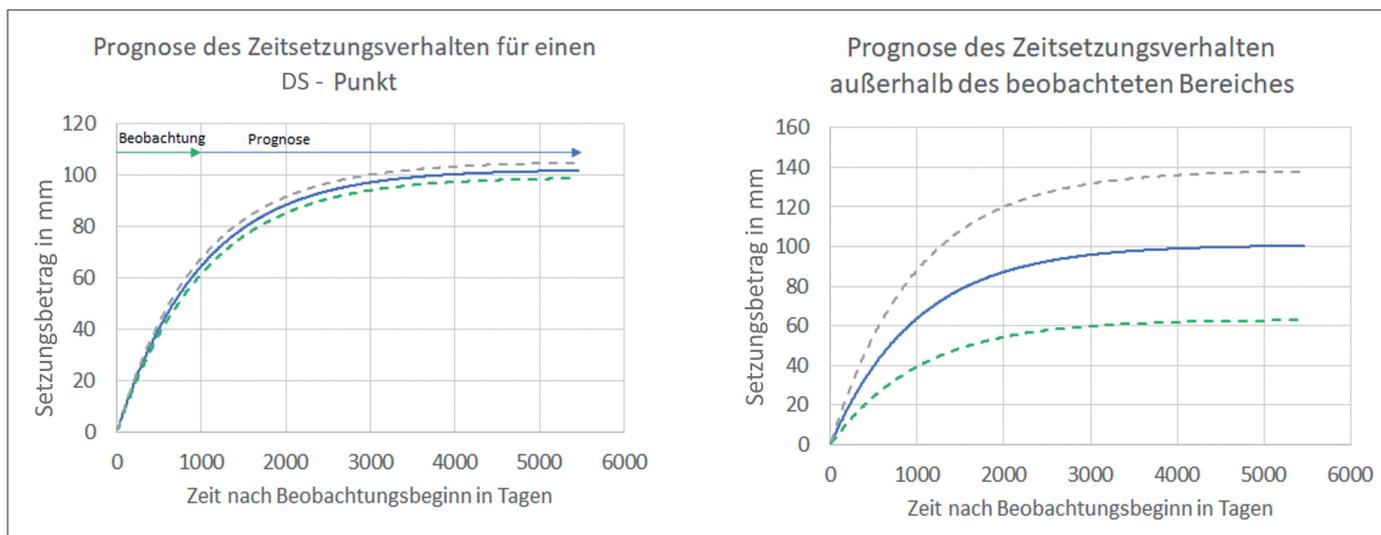


Abb. 15: Prognostizierte Zeitsetzungskurven mit Unsicherheit (Standardabweichung) für einen beobachteten DS-Punkt (links) und einem nicht beobachteten Punkt auf der Kippe (rechts).

Zusammenfassung und Ausblick

Das Verfahren der satellitengestützte Radarinterferometrie kann großflächig raum-zeitlich hochaufgelöste Bodenbewegungsdaten auf Tagebaukippen erzeugen. Für den Prozess der Eigensetzung von Massenschüttungen zeigt die Verknüpfung dieser Daten mit klassischen Zeitsetzungsmodellen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Schätzung der Parameter der Zeitsetzungskurven lässt sich durch die Anwendung der Methode der Kleinsten Quadrate einfach gestalten. Im Ergebnis entstehen flächig dicht verteilte Zeitsetzungsmodelle. Durch Extrapolation erlauben diese Modelle die Prognose des zeitlichen Setzungsverhaltens in vergleichsweise hoher Genauigkeit ohne detaillierte Kenntnis des Kippenaufbaus, nahezu rein datengetrieben. So können für beobachtete Bereiche der Kippe detaillierte Aussagen zu Restsetzungen in hoher Genauigkeit getätigt werden.

Erkenntnisse über das Setzungsverhalten lassen sich auf nicht beobachtete Bereiche der Kippe in gewissen Genauigkeitsgrenzen übertragen. Die Information aus der Radarinterferometrie liefert jedoch detaillierte Erkenntnisse zur räumlichen Struktur des Setzungsverhaltens und bieten eine reiche Datenbasis für mögliche weiterführende Analysen. Diese wurden hier nicht betrachtet, beinhalten z. B. das Etablieren von Zusammenhängen zwischen Setzungsverhalten und Kippentechnologie, Kippengeometrie, Materialzusammensetzung der Kippen, etc. Im Ergebnis könnten Prognosemodelle um relevante Faktoren erweitert und somit die Prognose in nicht beobachteten Bereichen verbessert werden.

Einschränkend ist zu erwähnen, dass der hier dargestellte Ansatz der Annahme der Stationarität des betrachteten Prozesses unterliegt. Das bedeutet, dass sich das räumliche und zeitliche Verhalten des Setzungsprozesses innerhalb der betrachteten Systemgrenzen nicht signifikant ändert.

Förderhinweis

Der Artikel wurde im Rahmen des H2020 – RFCS geförderten Projektes TRIM4PostMINING erstellt. Das Projekt erhält Förderung unter den Grant Agreement 899278.

Literaturstellen

- DORSCHNER, E. (1965): Setzungsverlauf der Tagebaukippe des Braunkohlenbergbaus, Bergakademie Freiberg, Freiburger Forschungsheft A 334.
- FENK, J. (2011): Entlastungseffekte im Lockergebirge. In: Markscheidewesen 111 (2004), Nr. 2, S. 49- 52.
- GALILÄER, P., BENNEWITZ, T. (2008): Autobahnbau auf Tagebaukippen im Südraum Leipzig. Straße und Autobahn, 7, 394-402.
- GESS, S. (2009): Bauen auf Tagebaukippen eine Herausforderung an die geotechnische Sicherheit. 17. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum „Junge Ingenieurgeologen“ in Zittau.
- GRZEMPOWSKI u.a.: 2020P, BADURA J, MILCZAREK W, BLACHOWSKI J, GŁOWACKI T, ZAJĄC M. (2020): Determination of the Long-Term Ground Surface Displacements Using a PSI Technique—Case Study on Wrocław (Poland). Applied Sciences. 2020; 10(10):3343. <https://doi.org/10.3390/app10103343>
- HALLBAUER, C. (1981): Geotechnische Grundlagen für die Errichtung von Eisenbahnstrecken auf Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaues unter besonderer Berücksichtigung des Eigensetzungsverhaltens. Unveröffentlichte Dissertation. Fakultät für Technik und Naturwissenschaften, der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden.
- KOTHEN, H. und KNÜFINKE, H. (1990): Restsetzungen auf Neulandflächen; Braunkohle 1990 (10), 24-29
- NEHRING, H. (1968): Markscheiderische Beobachtung von Kippensetzungen im rheinischen Braunkohlenrevier. Braunkohle, Wärme und Energie 20(3), 1968, Seite 83 - 91.
- Statista Research Department (2022, Dezember): Braunkohlenbergbau: Rekultivierte Flächen nach Nutzungsart in Deutschland bis 2021. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/184752/umfrage/braunkohlenbergbau-wieder-nutzbar-gemachte-flaechen-in-deutschland/>
- SCHRÖDER, C., BÜRGL, K., ANNANIAS, Y., NIEKLER, A., MÜLLER, L., WIEGREFFE, D., ... & HEYER, G. (2021): Supporting land reuse of former open pit mining sites using text classification and active learning. arXiv preprint arXiv:2105.05557.
- YANG, C. H., STEMMLER, C., PAKZAD, K., ZIMMERMANN, K., & MÜTERTHIES, A. (2022): INTEGRATED MINING IMPACT MONITORING (EU-PROJECT I 2 MON) FOR OPEN-PIT AND UNDERGROUND MINES. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 367-372.
- HANSEN, R.F. (2001): Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 pp. ISBN: 0-7923-6945-9
- WEGMULLER, U., WALTER, D., SPRECKELS, V., & WERNER, C. L. (2009): Nonuniform ground motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(2), 895-904.
- JOHN, A. (2021): Monitoring of Ground Movements Due to Mine Water Rise Using Satellite-Based Radar Interferometry—A Comprehensive Case Study for Low Movement Rates in the German Mining Area Lugau/Oelsnitz. Mining, 1(1), 35-58.
- BENNDORF, J., RESTREPO, D. A., MERKEL, N., JOHN, A., BUXTON, M., GUATAME-GARCIA, A., ... & KRESSNER, M. (2022): TRIM4Post-Mining: Transition Information Modelling for Attractive Post-Mining Landscapes—A Conceptual Framework. Mining, 2(2), 248-277.
- FERRETTI, A., FUMAGALLI, A., NOVALI, F., PRATI, C., ROCCA, F., & RUCCI, A. (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 49(9), 3460-3470.
- KNIPFER, A.; KRESSNER, M. (2022): Ergebnisse der Validierung des MIBRAG-Kippenmodells für die geotechnische Nachweisführung. Vortrag zum Altbergbaukolloquium 2022 an der TU Bergakademie Freiberg am 4. und 5. November 2022.
- NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden. De Gruyter Lehrbuch <https://doi.org/10.1515/9783110206784>.
- YIN, X. und BUSCH, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekongurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. In Tagungsband Geomonitoring 2018, S. 119 - 138.