

Automatisierte, clusterbasierte Detektion spatio-temporalen Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung

DR. FURUI XI & PROF. DR. WOLFGANG BUSCH

Aufgrund verschiedener Ursachen können die ermittelten PSI-Höhenänderungszeitreihen an einzelnen PS-Punkten von dem erwarteten flächenhaften Bodenbewegungsverhalten abweichen. Treten bei PSI-Zeitreihen solche spatio-temporalen Anomalien auf, werden bei der Ableitung der Höhenänderungsraten oder der Trendmodellierung der gesamten Zeitreihe falsche bzw. verfälschte Ergebnisse erzeugt, welche zu fehlerhaften Interpretationen des Bodenbewegungsverhaltens führen können. Aus diesem Grund müssen derartige Anomalien zuerst erkannt und aus dem PSI-Datensatz entfernt werden.

Zur Detektion solcher „Spatio-temporalen Anomalien“ wird ein neu entwickeltes raumzeitliches Clusterverfahren vorgestellt, welches die automatisierte Detektion von anomalen Zeitreihen an PS-Punkten in flächenhaft vorliegenden PSI-Ergebnissen ermöglicht. Dabei wird das Local-Moran's-Index-Clusterverfahren durch das Hinzufügen von zusätzlichen zeitlichen Gewichtungen zur Beurteilung der zeitlichen Abhängigkeit zweier PSI-Zeitreihen modifiziert und um eine kleinräumige Clusteranalyse ergänzt.

Abschließend erfolgt anhand von Testdaten eine Erprobung des neu entwickelten Clusterverfahrens zur Detektion spatio-temporalen Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung und eine Überprüfung des Analyseergebnisses mit einem neu entwickelten Validationsverfahren, basierend auf Höhenänderungsdifferenzen der Polynomausgleichung. Es kann gezeigt werden, dass eine Datenbereinigung mittels des neu entwickelten Clusterverfahrens zur automatisierten Detektion von spatio-temporalen Anomalien zuverlässig erfolgen und damit die Qualität einer flächenhaften Analyse und Beschreibung von Bodenbewegungen verbessert werden kann.

Due to various, also procedural reasons, the determined PSI time series of height changes at individual PS-points can deviate from the expected areal ground movement behavior. In PSI time series, if such spatio-temporal anomalies occur, erroneous or falsified results will be produced in deriving height change rates or trend modeling of the entire time series, which can lead to erroneous interpretations of ground movement behavior. For this reason, such anomalies must first be detected and removed from the PSI data set.

For the detection of such „spatio-temporal anomalies“, a newly developed spatiotemporal clustering method was presented, which allows the automated detection of abnormal time series at PS points in areal PSI results. Here, the Local Moran's Index clustering method was modified by the addition of additional time weights to assess the time dependence of two PSI time series and also supplemented by a small-scale cluster analysis.

Finally, based on test data, the newly developed cluster method for the detection of spatio-temporal anomalies in areal radar interferometric ground movement measurement was tested, and the analysis result with the newly developed clustering method was checked with a developed statistical validation method based on calculated differences of height changes. In summary, it was found that automated detection of spatio-temporal anomalies at mass PS points can be reliably performed by means of the newly developed clustering method. The data cleansing provided thereby makes an important contribution to the improvement of the quality of areal modeling of ground movements.

1. Einleitung

Im Allgemeinen stellt eine Anomalie eine extreme oder ungewöhnliche Beobachtung dar, die sich aufgrund einer vordefinierten Modellvorstellung von anderen Beobachtungen so auffallend unterscheidet, dass diese von dem durch die Mehrheit der Beobachtungen charakterisierten Datenverlauf abweicht und somit aus dieser ausgeschlossen werden kann (HAWKINS 2004). Dabei handelt es sich immer um ein relatives Verhältnis, welches nur im Zusammenhang mit einem global oder lokal vorliegenden Datensatz im Vergleich zu anderen Werten zu bewerten ist (CLARK 1989). In den Geowissenschaften sind die räumlichen Objekte durch ihre räumlichen Eigenschaften geprägt. Es gilt grundsätzlich die Annahme, dass je näher sich die räumlichen Objekte zueinander befinden, desto ähnlicher sind sie. Dies ist Ausdruck des ersten geographischen Gesetzes, das von *Waldo Tobler* im Jahr 1970 entwickelt wurde: „Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things“ (TOBLER 1970). Unter diesem Gesichtspunkt besitzt eine Anomalie in den Geowissenschaften eine deutliche, unerwartete Merkmalsausprägung im Vergleich zu den vergleichbaren Objekten in ihrer Nachbarschaft, z. B. eine geologische Störung, die eine deutliche lokale Veränderung in der großräumigen Struktur der geologischen Schichten hervorruft oder ein hoher gemessener lokaler Schwermetallgehalt im Boden, der im Vergleich zu Messwerten in der Nachbarschaft unerwartet erscheint.

Das Ziel der Anwendung von PSI-Verfahren ist die flächenhafte Überwachung von großräumigen Bodenbewegungen, wie sie z. B. durch Bergbauaktivitäten oder Grundwasserentnahme verursacht werden. Dazu werden sog. persistente Streuer (z. B. Hausdächer, Strommasten, Industrieanlagen) mit langzeitstabilen Rückstreueigenschaften zur Ermittlung von Bodenbewegungen detektiert. Obwohl das PSI-Verfahren nicht von dem Problem der Dekorrelation betroffen ist, können Anomalien in den Messwerten in Abhängigkeit von der Qualität und der Anzahl der angewendeten Radardaten, der Oberflächennutzung des Untersuchungsgebietes, der Geschwindigkeit und Richtung der aufgetretenen Bodenbewegungen sowie dem ausgewählten Auswerteverfahren nicht ausgeschlossen werden.

Da die PS-Punkte zu den räumlichen Daten mit Attributen gehören, enthalten sie nicht nur die räumlichen Attribute, wie beispielsweise die Koordinaten, welche die räumliche Lage der Objekte beschreiben, sondern auch die nicht räumlichen Attribute (z. B. Höhenänderungsrate), die an dem Ort des Objektes gemessen sind. Gemäß dem ersten geographischen Gesetz sollten räumlich nahe beieinander liegende PS-Punkte ähnliche Attribute als weiter voneinander

entfernte PS-Punkte besitzen. Darauf basierend kann ein PS-Punkt als räumliche Anomalie bewertet werden, wenn sich seine nicht-räumlichen Attributwerte (z. B. Höhenänderungsrate) deutlich von denen anderer PS-Punkte in ihrer räumlichen Nachbarschaft unterscheiden.

Darüber hinaus besitzt jeder PS-Punkt, außer seiner (definitionsbedingt) räumlichen unveränderten Lage, noch eine Höhenänderungszeitreihe zur Beschreibung seines Bewegungsverhaltens über die Zeit. Anhand der Datenstruktur können die PSI-Daten als spatio-temporale Daten definiert werden. Spatio-temporale Daten sind raumzeitliche Daten, die neben den beobachteten Attributen zusätzlich einen Raum- und Zeitbezug besitzen. Im Vergleich zu den herkömmlichen Daten werden bei den spatio-temporalen Daten unterschiedliche Attribute an einer bestimmten räumlichen Lage zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben. In diesem Sinne ist eine Anomalie in den PS-Punkten eine spatio-temporale Anomalie, dessen Attributwert deutlich von denen anderer PS-Punkte in der räumlichen und/oder zeitlichen Nachbarschaft abweicht. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine derartige spatio-temporale Anomalie (lila eingefärbter PS-Punkt) eines PS-Punktes, da seine lila dargestellte Höhenänderungszeitreihe deutlich von denen in ihrer Nachbarschaft abweicht.

Solche spatio-temporale Anomalien in den PS-Punkten lassen sich im statistischen Sinn als „unerwartete Beobachtungen“ verstehen. Sie gehören nicht zur Grundgesamtheit der anderen PS-Punkte und dürfen entweder als Messfehler, die als systematische, grobe und zufällige Abweichungen des Messergebnisses vom (unbekannten) wahren Wert zu definieren sind, oder als Ausdruck eines realen (aber ungewöhnlichen) Ereignisses interpretiert werden. Ursachen für solche Anomalien können z. B. ein (lokal) ungenaues digitales Geländemodell zur Abspaltung des topographischen Phasenanteils, atmosphärische Einflüsse sowie schnelle nichtlineare Bewegungsverläufe (die zu einem Phasenabwicklungsfehler führen können) sein. Hinzu kommen zufällige Abweichungen (Rauschen), die aufgrund der inneren Messgenauigkeit (u. a. abhängig vom verwendeten Radarsensor) unvermeidbar sind sowie die kurzfristigen anthropogen verursachten Bodenbewegungen, die als unerwartete Ereignisse gekennzeichnet sind (BUSCH 2016) und (XI 2015).

Falls es sich um eine fehlerhafte Messung handelt, wird eine solche Beobachtung einen Einfluss auf die Qualität der Analyseergebnisse ausüben, da bei der Ableitung der Höhenänderungsraten oder der Trendmodellierung einer gesamten Zeitreihe falsche bzw. verfälschte Ergebnisse erzeugt werden. Daher müssen in bewährter geodätischer Tradition derartige, als Anomalien detektierte PS-Punkte zuerst erkannt und anschließend aus dem PSI-Datensatz eliminiert werden.

Andererseits kann eine Anomalie in den PS-Punkten, die eine abrupte Änderung des Höhenänderungsverhaltens im Vergleich zu den umliegenden PS-Punkten aufweist, auch wertvolle Informationen für ein Untersuchungsgebiet beinhalten, sofern sie, nicht durch Messfehler verursacht, realitätsnahe Veränderungen ausdrückt. Durch die Identifizierung solcher Anomalien lassen sich somit unerwartete implizite Erkenntnisse in dem PSI-Datensatz sowie eine lokale Instabilität ableiten, die z. B. bei der Untersuchung und Detektion sich abzeichnender Tagesbrüche oder Erdfälle als Indikatoren von großer Bedeutung sein können. Besitzt ein reflektierendes Einzelobjekt ein eigenes Setzungs- oder Sackungsverhalten, dann repräsentieren

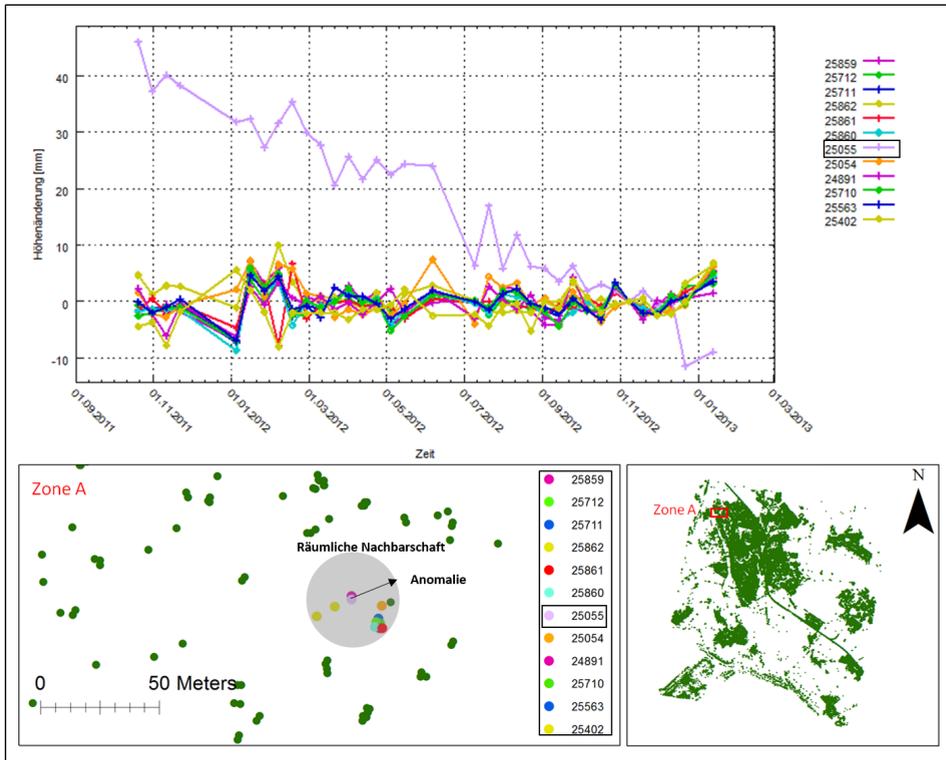


Abbildung 1: Abweichendes Höhenänderungsverhalten einer spatio-temporalen Anomalie gegenüber umgebenden PS-Punkten (verändert nach Xi 2015).

die Zeitreihen der PS-Punkte an einem solchen Objekt nicht die großräumigen Bodenbewegungen, da sie von dem (lokalen) Objekteigenverhalten überlagert sind. Auch in solchen Fällen besteht kann es hilfreich sein, diese infolge realer, aber unerwarteter Ereignisse entstandenen Anomalien zunächst zu identifizieren und anschließend zu prüfen, ob die „anormalen“ Höhenänderungen ursachenbezogen zu begründen sind. Für die Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen sind solche lokalen Anomalien jedoch ungeeignet und somit ihre Streichung vor Ableitung des Bewegungs- oder Verformungsverhaltens empfehlenswert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Entscheidung, ob die identifizierten Anomalien Messfehler sind oder reale, unerwartete Phänomene beschreiben, nur im Hinblick auf die (fachliche) Aufgabenstellung und eine Modellvorstellung, ggf. durch Nutzung weiteren anwendungsspezifischem Fachwissen, gefällt werden kann. Im Hinblick auf die Ermittlung/Modellierung generalisierter, flächenhafter Bodenbewegungen sind sie jedoch nicht repräsentativ für die Bestimmung solcher großräumiger Bodenbewegungen. Deshalb sollen

solche einzelnen PS-Punkte mit anormalen Höhenänderungsverhalten detektiert und unabhängig von der Ursache entsprechend gekennzeichnet (gespeichert) sowie für die Ableitung der Bodenbewegungen nicht berücksichtigt werden.

Die Identifizierung derartiger Anomalien ist nur unter Berücksichtigung von PS-Punkten in ihrer räumlichen bzw. raumzeitlichen Nachbarschaft möglich. Zu ihrer Detektion erscheinen räumliche Clusterverfahren als besonders zielführend (XI 2015).

Clusterverfahren werden in vielen Anwendungsbereichen, beispielsweise in der Archäologie, der Soziologie oder den Wirtschaftswissenschaften eingesetzt. Oft wird man mit der Forderung konfrontiert, die Untersuchungsobjekte im Hinblick auf die Ähnlichkeit der Ausprägungen der Merkmale zu Gruppen zusammen zu fassen, so dass Objekte innerhalb einer Gruppe möglichst homogen und gleichzeitig die Gruppen untereinander möglichst heterogen sind (BACKHAUS 2016). Bei räumlichen Clusterverfahren spielt außerdem die räumliche Beziehung (Nähe) zwischen den untersuchten Objekten eine große Rolle. Mit Distanzbeziehungen lassen sich Objekte von Objekten in anderen Clustern abgrenzen.

Grundgedanke bei der Detektion von Anomalien in flächenhaft vorliegenden PSI-Ergebnissen ist, dass beim Auftreten von flächenhaften Bodenbewegungen alle eine deformierte Fläche repräsentierenden Punkte in ihrem räumlichen Umfeld eine ähnliche Höhenänderung (oder allgemein, ähnliche Werte eines anderen Merkmals) aufweisen. Einzelne Punkte mit davon stark abweichendem Höhenänderungsverhalten können entweder auf ein lokales objektspezifisches Bewegungsverhalten hinweisen (und sind damit nicht repräsentativ für die zu detektierende flächenhafte Bodenbewegung) oder sind Ausdruck verfahrenstechnisch bedingter fehlerhafter Anomalien. Somit könnten solche detektierten Punkte, als nicht repräsentativ für Bodenbewegungen oder als messtechnisch grob fehlerhaft, mithilfe der Clusteranalyse erkannt und bzw. eliminiert werden (XI 2015).

Da es sich bei dem PSI-Datensatz um eine Datenstruktur von spatio-temporalen Daten handelt, in denen die zeitlichen und räumlichen Eigenschaften miteinander so eng gekoppelt sind, dass sie nicht voneinander getrennt betrachtet werden dürfen, soll ein Clusterverfahren für die Detektion von spatio-temporalen Anomalien in den PS-Punkten in der Lage sein, nicht nur die Werteveriationen der PS-Zeitreihen (z. B. Deformationsrate) sondern auch die räumlichen Beziehungen der PS-Punkte zu berücksichtigen.

2. Clusterverfahren zur automatisierten Detektion spatio-temporalen Anomalien

Basierend auf der räumlichen Autokorrelation bietet die Local-Moran's-Index-Clusteranalyse (LISA) (ANSELIN 1995) die Möglichkeit, beim Clusterungsvorgang auch spatio-temporale Anomalien zu identifizieren. Ausgehend von den PSI-Datensätzen wird untersucht, ob sich die PS-Punkte hinsichtlich der erhobenen Merkmale „deutlich“ von den Merkmalen der anderen PS-Punkte in ihrer Nachbarschaft unterscheiden und als Anomalien auszuweisen sind. Dabei werden nicht nur die räumlichen Beziehungen zwischen den PS-Punkten sondern auch die raumzeitlichen Abhängigkeiten (Autokorrelationen) der nicht-räumlichen Eigenschaften

(z. B. die Höhenänderungen, die Höhenänderungsraten, die Trendpolynomgrade usw.) des PS-Punktes gleichzeitig berücksichtigt. Nachfolgend wird das Grundprinzip der Local-Moran's-Index-Clusteranalyse vorgestellt und ihre Anwendbarkeit für die Anomalieerkennung in PSI-Daten dargestellt.

2.1. Algorithmus des Local-Moran's Index-Clusterverfahrens

Das Local-Moran's-Index-Verfahren, das zu einem der am häufigsten verwendeten Verfahren zur Bestimmung der lokalen räumlichen Autokorrelation gehört, wurde von LUC ANSELIN im Jahr 1988 entwickelt (ANSELIN 1988). Die räumliche Autokorrelation kann als eines der wichtigsten Bewertungskriterien für raumbezogene Fragestellungen betrachtet werden, wobei „auto“ darauf hindeutet, dass Beobachtungen sich auf ein und dieselbe Variable, nicht aber auf zwei unterschiedliche Variablen beziehen. Beim Vorhandensein der lokalen räumlichen Autokorrelation sind die Ähnlichkeiten oder die Unterschiede der von einer bestimmten räumlichen Distanz getrennten Beobachtungen in dem lokalen Bereich größer, als dies bei zufälligen Prozessen zu vermuten wäre (LEGENDRE 1993). Bei der räumlichen Autokorrelation sind drei Typen zu unterscheiden:

- Positive räumliche Autokorrelation: Zeigt an, dass Objekte, die sich in räumlicher Nähe zueinander befinden, ähnlichere Werte derselben Variablen besitzen als weiter entfernte Objekte.
- Negative räumliche Autokorrelation: Zeigt an, dass Objekte, die sich in räumlicher Nähe zueinander befinden, unähnlichere Werte derselben Variablen besitzen.
- Keine räumliche Autokorrelation: Zeigt an, dass die beobachtete Variable von Objekten nicht ortsabhängig ist (in Bezug auf die beobachtete Variable verteilen sich die Objekte zufällig im Untersuchungsraum).

Basierend auf Nachbarschaftsverhältnissen zwischen den gemessenen Untersuchungsobjekten dient das Local-Moran's-Index-Verfahren der Erkennung von Clustern und Anomalien. Dadurch können nicht nur Bereiche von Objekten mit ähnlichen Variablenwerten als lokale Cluster abgegrenzt sondern auch Objekte mit auffällig andersartigen Variablenwerten als Anomalien identifiziert werden. Zur Berechnung des Local-Moran's-Index dient Formel 1 (ANSELIN 1995):

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S_i^2} \quad (1)$$

in der S gemäß Formel 2 bestimmt wird:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2)$$

mit

x_i : Wert der beobachteten Variable des Objektes i ,

x_j : Wert der beobachteten Variable des Objektes j (j ist Nachbar von i),

\bar{x} : Mittelwert der beobachteten Variablen aller Objekte,

w_{ij} : räumliche Gewichtung zwischen Objekt i und j ,

S_i^2 : Varianz des Variablenwertes.

Der Zähler der Formel 1 beinhaltet das Produkt aus der Abweichung des Variablenwertes des Untersuchungsobjektes i vom Mittelwert und der Summe aller n gewichteten Abweichungen der benachbarten Objekte j vom Mittelwert. Der Nenner entspricht der Varianz der Variablen aller n Objekte in dem gesamten Untersuchungsraum. Da die Varianz der Variablen (S_i^2) für ein bestimmtes Untersuchungsgebiet als positive Konstante angesehen werden kann, besitzt das Produkt $((x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x}))$ in der Gleichung eine entscheidende Rolle für die Bestimmung der lokalen räumlichen Autokorrelation. Drei Fälle sind zu unterscheiden:

- i. Das Produkt besitzt einen positiven Wert: Dieser Fall liegt vor, wenn das Untersuchungsobjekt i und die benachbarten Objekte gleichzeitig überdurchschnittliche oder unterdurchschnittliche Variablenwerte aufweisen.
- ii. Das Produkt besitzt einen negativen Wert: Dies ergibt sich, wenn das Untersuchungsobjekt i und überdurchschnittlich viele benachbarte Objekte von i abweichende Variablenwerte vom Mittelwert besitzen.
- iii. Das Produkt hat einen Wert nahe bei null: Dies tritt ein, wenn der Variablenwert des Untersuchungsobjektes i oder/und das gewichtete arithmetische Mittel aus den Variablenwerten benachbarter Objekte von i dem Mittelwert entspricht.

Der Local-Moran's-Index I_i ist normiert, da das Produkt durch die Varianz dividiert wird. Da die Varianz immer einen positiven Wert besitzt, besitzt der Local-Moran's-Index immer das gleiche Vorzeichen wie das Produkt $((x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x}))$. Positive Index-Werte entsprechen einer positiven räumlichen Autokorrelation, d. h. das Untersuchungsobjekt hat einen ähnlichen Variablenwert wie der seiner benachbarten Objekte. Somit bildet sich ein Cluster mit hohen oder niedrigen Variablenwerten. Da sie positiv miteinander autokorreliert sind, ist das betrachtete Objekt i Teil eines Clusters. Negative Index-Werte deuten an, dass es eine negative räumliche Autokorrelation in dem Lokalbereich gibt und das Untersuchungsobjekt einen abweichenden Variablenwert im Vergleich zu seinen benachbarten Objekten besitzt; somit ist das Objekt in diesem Sinne eine Anomalie. Wenn der Index-Wert in der Nähe von Null liegt, bedeutet dies, dass es keine räumliche Autokorrelation gibt und sich die Variablenwerte im lokalen Bereich zufällig verteilen (ANSELIN 1995).

Für jedes Untersuchungsobjekt ergibt sich ein Local-Moran's-Index, mit dem festgestellt werden kann, ob das untersuchte Objekt bezogen auf die Variablenwerte der Untersuchungsobjekte Teil eines lokalen Clusters oder eine lokale Anomalie im Vergleich zu seiner Nachbarschaft ist.

Da eine räumliche Autokorrelation bei flächenhaften Bodenbewegungen in lokalen Bereichen besteht, kann der Local-Moran's-Index zur Detektion von spatio-temporalen Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung eingesetzt werden.

Der allgemeine Verfahrensablauf des Local-Moran's-Index-Clusterverfahrens zur Identifizierung von Anomalien ist in Abbildung 2 dargestellt.

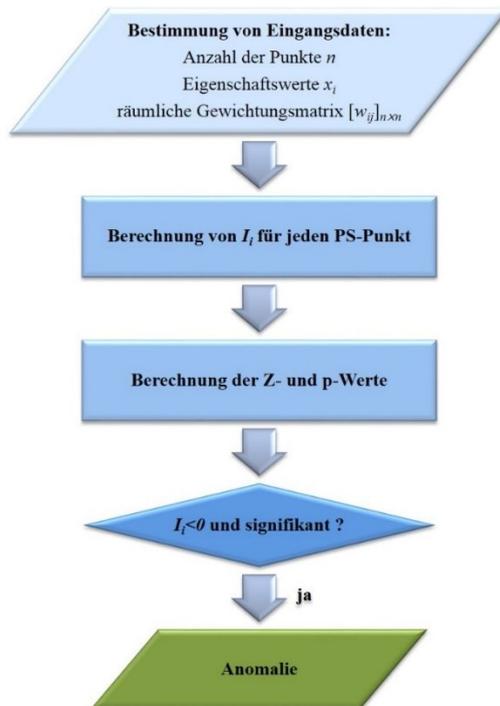


Abbildung 2: Allgemeiner Verfahrensablauf des Local-Moran's-Index-Clusterverfahrens zur Detektion von Anomalien.

Mithilfe des Verfahrens sollen räumliche Cluster mit hohen oder niedrigen Eigenschaftswerten gebildet und darauf aufbauend räumliche Anomalien identifiziert werden. Als Inputdaten dient ein räumlicher Datensatz, in dem jedes Untersuchungsobjekt einen lagebezogenen sachgemäßen Eigenschaftswert besitzt. Anhand der räumlichen Beziehungen zwischen den Untersuchungsobjekten wird zuerst die räumliche Gewichtungsmatrix berechnet. Sie fließt später zusammen mit den Eigenschaftswerten der Untersuchungsobjekte als Eingangsparameter in die Berechnung ein. Als Ergebnis wird danach ein Local-Moran's-Index-Wert, ein Z-Ergebnis und ein p-Wert für jedes Untersuchungsobjekt erhalten. Dabei dient der I-Wert zur Einordnung der betrachteten Objekte in Clustern und zur Identifizierung von Anomalien, während

die Z-Ergebnisse und p-Werte zur Prüfung der statistischen Signifikanz der berechneten Indexwerte dienen (XI 2015).

Ein positiver und signifikanter Wert von I_i ($I_i > 0$) bedeutet, dass das Untersuchungsobjekt i einen ähnlichen Eigenschaftswert wie seine benachbarten Objekte besitzt. Da die Objekte positiv miteinander autokorreliert sind, ist das Untersuchungsobjekt Teil eines Clusters. Im Gegensatz dazu bedeutet ein negativer signifikanter Wert von I_i ($I_i < 0$) dass das Untersuchungsobjekt i einen deutlich größeren oder kleineren Eigenschaftswert als die benachbarten Objekte besitzt. Da sie negativ miteinander autokorreliert sind, kann das Untersuchungsobjekt als eine „Anomalie“ bezeichnet werden. $I_i = 0$ bedeutet, dass keine Autokorrelation zwischen dem Objekt i und den benachbarten Objekten vorliegt (XI 2015).

2.2. Algorithmus des modifizierten Local-Moran's Index-Clusterverfahrens

Mittels dieser Clusteranalyse wurden jedoch bei den praktischen Anwendungen auch PS-Punkte detektiert, die sich in ihrem zeitlichen Höhenänderungsverhalten kaum von dem Verhalten benachbarter Punkte unterscheiden. Ursache hierfür kann sein (wie auch in anderen Fällen), dass die z. B. durch Bergbauaktivitäten verursachten Höhenänderungen im gesamten Untersuchungszeitraum zeitweise und punktbezogen sowohl lineare als auch nicht lineare Höhenänderungstrends aufweisen können, und deshalb im Falle eines nichtlinearen Höhenänderungsverhalten durch eine generalisierende, lineare Höhenänderungsrate, die sich aus einem linearen Regressionsmodell ergibt, verfälscht wiedergegeben werden. Offensichtlich reicht zur Beschreibung des charakteristischen Verlaufs einer Höhenänderungszeitreihe ein einziges Attribut (Merkmal) nicht aus. Da bei der Local-Moran's-Index-Clusteranalyse jedoch nur ein einziges Attribut (Eigenschaftswert) berücksichtigt werden kann, erfolgt eine Modifikation dieses Verfahrens durch Einführung eines Gewichtungsfaktors zur Beurteilung und Quantifizierung der Ähnlichkeit der Höhenänderungsverläufe zweier PS-Punkte.

Zur Ableitung der Ähnlichkeit des Höhenänderungsverlaufes verschiedener PS-Punkte kann der Pearson-Korrelationskoeffizient verwendet werden, der durch folgende Formel bestimmt wird (HARTUNG 1999):

$$r_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^n (i_t - \bar{i})(j_t - \bar{j})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (i_t - \bar{i})^2 * \sum_{t=1}^n (j_t - \bar{j})^2}} \quad (3)$$

mit:

(i_t, j_t) : Eigenschaftswerte am gleichen Datum t der Zeitreihen an den Punkten i und j ,

\bar{i}, \bar{j} : Mittelwerte aller Eigenschaftswerte der Zeitreihen an den Punkten i und j .

Bezogen auf die PSI-Daten entsprechen in der Formel die Wertepaare (i_t, j_t) den Höhenänderungswerten der PS-Punkte i und j zum gleichen Datum t . Der Pearson-Korrelationskoeffizient besitzt einen Wertebereich von $[-1,1]$; je größer der Wert ist, desto ähnlicher sind die Zeitreihen der Punkte i und j . Um den Koeffizienten als Gewichtungsfaktor in die Formel zur Berechnung

des Local-Moran's-Index zu integrieren, wird der Pearson Korrelationskoeffizient vorher noch mittels Formel 4 normiert, so dass die Werte im Bereich von $[0,1]$ liegen.

$$\widetilde{r}_{ij} = \frac{r_{ij} + 1}{2} \quad (4)$$

Die modifizierte Formel zur Berechnung des Local-Moran's-Index ergibt sich entsprechend:

$$\widetilde{I}_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \widetilde{r}_{ij} * w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

mit:

x_i : Wert der beobachteten Variable am PS-Punkt i ,

x_j : Wert der beobachteten Variablen am PS-Punkt j (j ist ein Nachbar von i),

\bar{x} : Mittelwert der beobachteten Variablen aller PS-Punkte (ohne Punkt i),

w_{ij} : die räumliche Gewichtung zwischen PS-Punkt i und j ,

\widetilde{r}_{ij} : die zeitliche Gewichtung zwischen PS-Punkt i und j .

Damit können nun auch die zeitlichen Korrelationen (Ähnlichkeiten) zwischen dem betrachteten PS-Punkt und seinen benachbarten PS-Punkten bei der Berechnung des Local-Moran's-Indizes berücksichtigt und so eine raumzeitliche Clusteranalyse basierend auf raumzeitlicher Autokorrelation für die Suche von Anomalien ermöglicht werden.

2.3. Kleinräumige Clusteranalyse

Da gemäß Formel 5 zur Berechnung des modifizierten Local-Moran's-Index der Mittelwert (\bar{x}) der Variablenwerte aller PS-Punkte im Untersuchungsgebiet eingeht, wurde untersucht, ob ggf. durch diese „Globalisierung“ lokale Abweichungen unerkannt bleiben können. Hierzu wurden PS-Punkte, die nach der Clusteranalyse positive Indexwerte erhielten und demnach als Punkte eines Clusters einzustufen waren, näher untersucht. Es zeigte sich, dass einzelne dieser Punkte unerwarteter Weise deutlich bezüglich der Höhenänderungsraten von PS-Punkten in ihrer Umgebung abweichen. Ursache hierfür kann sein, dass manchmal der globale Mittelwert der Höhenänderungsrate (\bar{x}) nicht für die Berechnung des Local-Moran's-Index geeignet ist.

Maßgeblich für die Entscheidung, ob der betrachtete PS-Punkt eine anormale Zeitreihe besitzt, ist das Vorzeichen des Local-Moran's-Index. Da der Nenner in Formel 5 immer positiv ist, bestimmt der Zähler das Vorzeichen des Index. Ein positives Vorzeichen ergibt sich, wenn $(x_i - \bar{x})$ und $\sum_{j=1}^n \widetilde{r}_{ij} * w_{ij} (x_j - \bar{x})$ gleiches Vorzeichen besitzen bzw. die Abweichung des untersuchten PS-Punktes vom Mittelwert und die Summe aller Abweichungen der benachbarten PS-Punkte vom Mittelwert gleiches Vorzeichen besitzen (da \widetilde{r}_{ij} und w_{ij} größer Null sind). Obwohl x_i viel größer oder kleiner als der Mittelwert aller benachbarten PS-Punkte x_j ist, erhält bei ungünstigem globalen Mittelwert das Produkt $(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \widetilde{r}_{ij} * w_{ij} (x_j - \bar{x})$

und somit der Local-Moran's-Index einen positiven Wert und der untersuchte PS-Punkt wird gemäß der modifizierten Local-Moran's-Index-Clusteranalyse nicht als Anomalie detektiert.

Deshalb erfolgt zur Verbesserung des Analyseergebnisses eine Ergänzung des Verfahrens durch eine kleinräumige Clusteranalyse. Hierzu werden die Höhenänderungsraten der PS-Punkte, die nach der modifizierten Local-Moran's-Index-Clusteranalyse als signifikante Clusterpunkte (mit positiven Indexwerten) identifiziert wurden, mit dem Werteintervall, das durch den Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung σ der Höhenänderungsraten ihrer Nachbarnpunkte (ohne den zu untersuchenden Clusterpunkt) innerhalb des festgelegten Suchradius definiert ist, verglichen. Ein Clusterpunkt kann als eine Anomalie erkannt werden, wenn er nicht in das Werteintervall $[\bar{x} - 4\sigma, \bar{x} + 4\sigma]$ fällt, da sich bei Annahme einer Normalverteilung nahezu 99,99 % aller Höhenänderungsraten im dem 4σ -Bereich befinden sollten. Die zu den restlichen 0,01 % gehörenden Werte unterscheiden sich stark vom Mittelwert und somit deutlich von den anderen Werten; sie gehören nicht zu der statistischen Verteilung der übrigen Werte ihrer benachbarten PS-Punkte und können dementsprechend als Anomalien deklariert werden.

2.4. Validierung des Analyseergebnisses

Obwohl visuelle Vergleiche der PSI-Höhenänderungszeitreihen eine Bestätigung für die deutlichen Abweichungen der detektierten Zeitreihen gegenüber ihren Nachbarzeitreihen aufzeigen lassen und dadurch die „Richtigkeit“ des Ergebnisses geprüft werden kann, erscheint eine visuelle Überprüfung bei der großen Punktanzahl detektierter Anomalien zu aufwändig und auch zu subjektiv. Daher besteht der Bedarf, eine automatisierte und objektivere Prüfmethode zur Validation des Analyseergebnisses zu entwickeln.

Hierzu bietet sich als Prüfkriterium, analog zu einem visuellen Vergleich, die Höhenänderungsdifferenz zwischen dem ersten und letzten Datum der Zeitreihe an. Dabei sind jedoch die statischen Unsicherheiten der Messwerte zu berücksichtigen. Deshalb erfolgt die Berechnung der Höhenänderungsdifferenzen auf Grundlage der Funktionswerte der für jeden PS-Punkt mittels Ausgleichung bestimmten Trendpolynome und durch Differenzbildung der Funktionswerte für das erste und letzte Datum einer Zeitreihe. Diese Berechnungen werden für jeden detektierten, anormalen PS-Punkt und seine Nachbarn durchgeführt.

Bildet man den gewogenen arithmetischen Mittelwert aus allen so berechneten Höhenänderungsdifferenzen der benachbarten PS-Punkte, kann der Quotient aus seinem Unterschied gegenüber der Höhenänderungsdifferenz des detektierten, anormalen PS-Punktes und der Standardabweichung der Differenz als Kriterium für eine Validierung herangezogen werden. Ist der Quotient gemäß Formel 6 größer oder gleich k , deutet dies darauf hin, dass die Höhenänderungsdifferenz der als anormal detektierten Zeitreihe eine signifikante Abweichung gegenüber den Höhenänderungsdifferenzen der Nachbarn aufweist und somit der identifizierte anormale PS-Punkt anhand des Validationskriteriums als „richtig“ detektiert bezeichnet werden kann. Der Wert von k hängt von einem gewählten Signifikanzniveau ab (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Signifikanzniveau und k .

Signifikanzniveau	10 %	5 %	1 %
k	1,65	1,96	2,58

$$\frac{|\Delta h_o - \overline{\Delta h_j}|}{s_D} \geq k \quad (6)$$

mit:

Δh_o : Höhenänderungsdifferenz am detektierten anomalen PS-Punkt o ,

$\overline{\Delta h_j}$: gewogener arithmetischer Mittelwert der Höhenänderungsdifferenzen aller benachbarten PS-Punkte j des Punktes o ,

s_D : Standardabweichung der Differenz $\Delta h_o - \overline{\Delta h_j}$,

k : Konstante zur Charakterisierung des Signifikanzniveaus.

Da die aus den Trendfunktionen abgeleiteten Höhenänderungsdifferenzen der benachbarten PS-Punkte j unterschiedliche Standardabweichungen aufweisen können, wird ihr Mittelwert als gewogener Mittelwert unter Nutzung der Formel 7 berechnet.

$$\overline{\Delta h_j} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta h_j * p_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (7)$$

mit:

Δh_j : Höhenänderungsdifferenz eines benachbarten PS-Punktes j ,

p_j : Gewicht der Höhenänderungsdifferenz eines benachbarten PS-Punktes j .

Die Gewichte p_j der n Höhenänderungsdifferenzen Δh_j ergeben sich mit Hilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes und den aus der Polynomgleichung ableitbaren Varianzen der Funktionswerte für das erste und letzte Messdatum der jeweiligen PSI-Zeitreihe.

Die Standardabweichung s_D der Differenz $\Delta h_o - \overline{\Delta h_j}$ lässt sich mit Hilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes auf Grundlage der Varianz der Höhenänderungsdifferenz Δh_o des detektierten anomalen PS-Punktes o und der Varianz des gewogenen arithmetischen Mittelwertes der Höhenänderungsdifferenzen aller benachbarten PS-Punkte mittels Formel 8 berechnen.

$$s_D = \sqrt{s_{\Delta h_o}^2 + s_{\overline{\Delta h_j}}^2} \quad (8)$$

mit:

$s_{\Delta h_o}$: Standardabweichung der Höhenänderungsdifferenz des detektierten anomalen PS-Punkt o ,

$s_{\overline{\Delta h_j}}$: Standardabweichung des gewogenen arithmetischen Mittelwertes der Höhenänderungsdifferenzen aller benachbarten PS-Punkte j .

Die Varianz $s_{\overline{\Delta h_j}}^2$ kann mittels Formel 9 berechnet werden:

$$s_{\overline{\Delta h_j}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n p_j * v_j^2}{(n-1) \sum_{j=1}^n p_j} \quad (9)$$

mit:

p_j : Gewicht der Höhenänderungsdifferenz eines benachbarten PS-Punktes j ,

v_j : Verbesserung der Höhenänderungsdifferenz eines benachbarten PS-Punktes j .

Die Verbesserung der Höhenänderungsdifferenz (in Formel 9) eines benachbarten PS-Punktes j ergibt sich gemäß Formel 10:

$$v_j = \overline{\Delta h_j} - \Delta h_j \quad (10)$$

Mit diesem Ansatz wird anders als bei der Clusteranalyse, bei der die Höhenänderungsrate von PS-Punkten als Attribut benutzt wird, die ausgeglichene Höhenänderungsdifferenz herangezogen. Die nach den Clusteranalysen identifizierten anomalen Zeitreihen, die auch das Validationskriterium erfüllt haben, können letztendlich als wirkliche Anomalien bezeichnet werden, da sie anhand sowohl der Höhenänderungsrate als auch der Höhenänderungsdifferenz signifikant von dem Verhalten ihrer benachbarten PS-Punkte abweichen. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass bei Anwendung dieses Validationskriteriums die Validation basierend auf den ausgeglichenen Höhenänderungsdifferenzen ausschließlich innerhalb des vordefinierten Suchradius stattfindet; sie verlangt auch, gemäß dem Grundprinzip einer Clusteranalyse, dass sich für eine erfolgreiche Durchführung des Validationsvorgangs eine genügende Anzahl von PS-Punkten in der Nachbarschaft des zu validierenden PS-Punktes befinden müssen.

2.5. Ablauf des Clusterverfahrens

Zusammenfassend ist der Ablauf des entwickelten Clusterverfahrens zur Detektion spatio-temporalen Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung (XI 2017) in Abbildung 3 dargestellt.

Zuerst wird anhand der vorliegenden PSI-Daten ein Suchradius für das gesamte Untersuchungsgebiet ermittelt. In einem weiteren Schritt sind geeignete Attribute zur Charakterisierung der PS-Punkte auszuwählen. Hierbei erwies sich die Höhenänderungsrate als charakteristisches Suchmerkmal (Attribut) geeignet (XI 2015). Gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.2 erfolgt die Einführung des Pearson Korrelationskoeffizienten als normierter Gewichtungsfaktor zur Modellierung der zeitlichen Autokorrelationen zwischen den benachbarten PS-Punkten.

Darüber hinaus wurde die Auswahlmöglichkeit geschaffen, die abgeleiteten räumlichen und zeitlichen Gewichtungen zu normieren, indem jede Gewichtung des Nachbarpunktes durch die Summe aller Gewichtungen der benachbarten PS-Punkte innerhalb des Suchradius dividiert wird. Damit kann sichergestellt werden, dass die Summe aller Gewichtungen für jeden untersuchten PS-Punkt „Eins“ ergibt. Die so berechnete proportionale Gewichtung wird als „normierte Gewichtung“ für die nachfolgende Clusteranalyse eingesetzt.

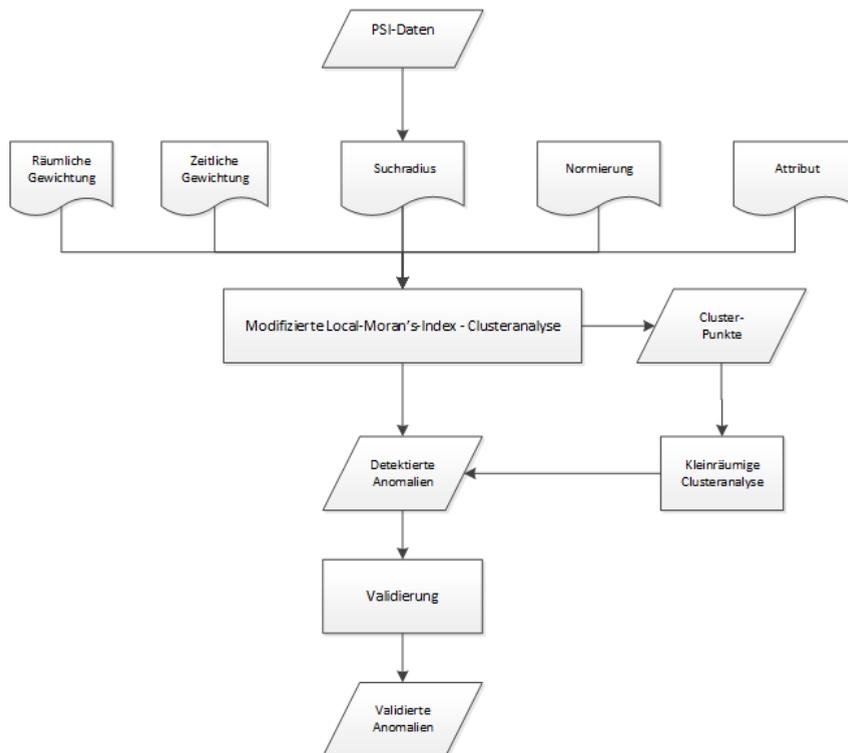


Abbildung 3: Prozessablauf des entwickelten Clusterverfahrens zur Detektion spatio-temporaler Anomalien.

Nach der Durchführung der modifizierten Local-Moran's-Index-Clusteranalyse wird für die detektierten signifikanten Clusterpunkte noch eine kleinräumige Clusteranalyse vorgenommen, um die Nachteile einer Anwendung eines globalen Parameterwertes bei der Detektion von anomalen PS-Punkten in lokalen Untersuchungsteilbereichen zu beheben. Als letzter Schritt des Prozessablaufs erfolgt die Validierung der Clusterergebnisse. Nur die sich als signifikant anomal erwiesenen PS-Punkte werden deshalb als „validierte spatio-temporale Anomalien“ bezeichnet und ausgesondert.

3. Anwendung des entwickelten Clusterverfahrens mit Testdaten

Dieser praktikable Ansatz zur automatisierten Detektion von spatio-temporalen Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung wurde an praktischen Beispielen getestet und untersucht.

Für die Detektion von spatio-temporalen Anomalien an PS-Punkten kamen u. a. Szenen des kanadischen Radarsatelliten Radarsat-2 zum Einsatz. Im Untersuchungsraum konnten insgesamt ca. 78 000 PS-Punkte mit der PSI-Methode für einen Datenstapel mit 77 Szenen (= 77 Messzeitpunkte) im Zeitraum 06/2010 – 11/2015 ermittelt werden. Das hierauf angewendete, modifizierte Local-Moran's-Index-Clusterverfahren benutzte folgende Eingangsparameter:

- Suchradius: 200 m
- Betrachtetes Attribut: Höhenänderungsrate
- Gewichtungsmethode: räumliche und zeitliche Gewichtung
- Normierung: aller Gewichte
- Signifikanzniveau: 5 %

Mittels der modifizierten Local-Moran's-Index-Clusteranalyse konnten insgesamt 157 PS-Punkte mit anormalen Zeitreihen identifiziert werden, deren räumliche Lage in Abbildung 4 (rot markierte Punkte) dargestellt ist. Die detektierte Punktzahl entspricht etwa 0,2 % aller PS-Punkte im Untersuchungsgebiet, die ein statistisch signifikant abweichendes Höhenänderungsverhalten im Vergleich zu dem ihrer räumlichen Nachbarnpunkte innerhalb des Suchradius aufweisen.

Exemplarisch sind die Höhenänderungszeitreihen von zwei detektierten PS-Punkten in Abbildung 5 und 6 (Zeitreihen A und B) mit den Zeitreihen der PS-Punkte in ihrer Nachbarschaft gegenübergestellt. Um die Abweichungen der Höhenänderungszeitreihen graphisch besser erkennen zu können, wurden die Zeitreihenwerte der benachbarten PS-Punkte für jeden Messzeitpunkt gemittelt dargestellt.

Die wesentlichen charakteristischen Merkmale (Höhenänderungsrate, Anzahl der benachbarten PS-Punkte) der in Abbildung 5 und 6 dargestellten anormalen Zeitreihen sowie ihre Analyseergebnisse aus der modifizierten Local-Moran's-Index-Clusteranalyse (Local-Moran's-Index-Wert, Z-Wert und p-Wert) sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Charakteristische Merkmale der in Abbildung 5 und 6 dargestellten spatio-temporalen Anomalien.

Anomalie	Höhenänderungsrate	Anzahl der Nachbarn	Index-Wert	p-Wert
Zeitreihe A	2,30	137	-0,38	≈ 0
Zeitreihe B	-5,12	138	-0,41	≈ 0

Innerhalb eines Suchradius von 200 m verfügen sie alle über mehr als 130 benachbarte PS-Punkte. Obwohl sie unterschiedlich starke Höhenänderungsraten besitzen, ergaben sich für alle

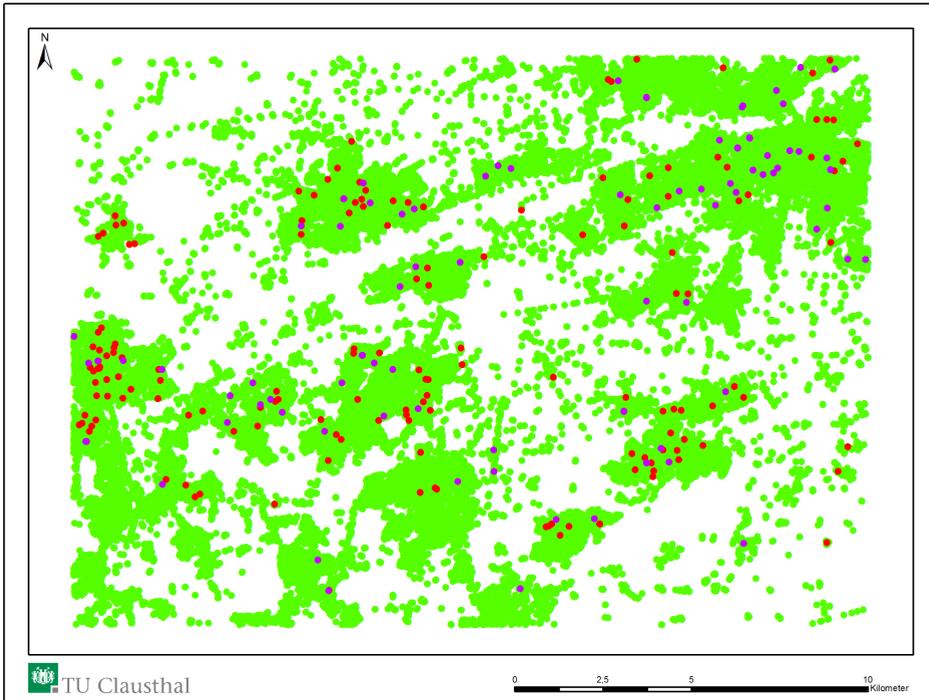


Abbildung 4: Räumliche Lage der detektierten spatio-temporalen Anomalien.

negative Local-Moran's-Index-Werte, was eindeutig darauf hindeutet, dass sie ein abweichendes Höhenänderungsverhalten im Vergleich zu dem ihrer benachbarten PS-Punkte aufweisen; sie sind negativ mit ihren Nachbarn autokorreliert. Darüber hinaus kann dieses Analyseergebnis mit einem p-Wert fast gleich 0 als „statistisch signifikant“ (bei einem Signifikanzniveau von 5 %) bezeichnet werden.

Der visuelle Vergleich der Zeitreihen in Abbildung 5 und 6 bestätigt dieses Ergebnis; die Abweichungen zwischen den anormalen Zeitreihen der Punkte A, B und den gemittelten Zeitreihen ihrer Nachbarn sind erheblich. So zeigt die Zeitreihe A eine deutliche Hebung über den Untersuchungszeitraum, während die gemittelte Zeitreihe eine deutliche Senkung aufweist. Der Vergleich für die Zeitreihe B zeigt hinsichtlich Zeitreihenverlauf und quantitativen Unterschieden ein etwas anderes Bild; die gemittelte Nachbarzeitreihe beinhaltet nahezu keine Senkung, während die Zeitreihe B durch den kontinuierlichen Senkungsverlauf eine Gesamtsenkung von ca. 25 mm besitzt.

Nach der Durchführung der modifizierten Local-Moran's-Index-Clusteranalyse erfolgte anschließend die kleinräumige Clusteranalyse für die detektierten Clusterpunkte. Hierdurch kann

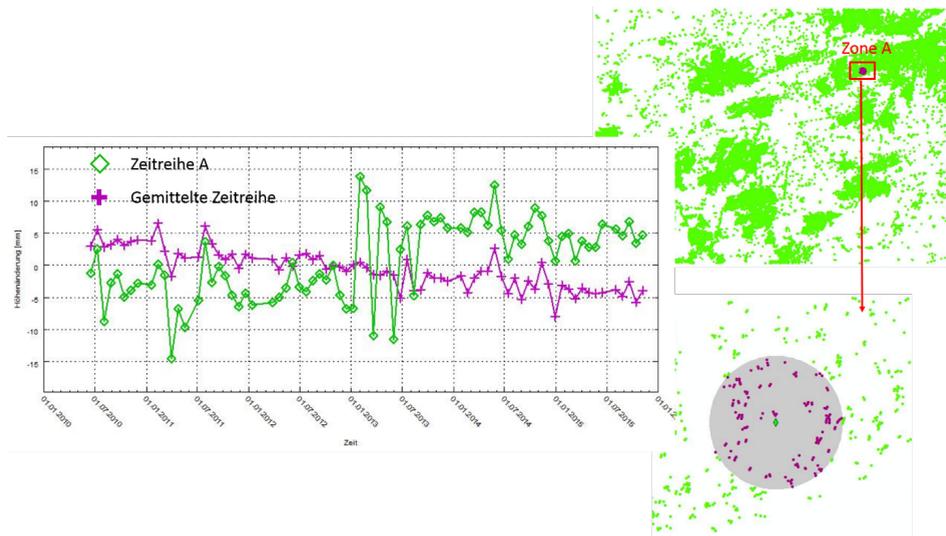


Abbildung 5: Gegenüberstellung der detektierten spatio-temporalen Anomalie A mit der gemittelten Zeitreihe benachbarter PS-Punkte.

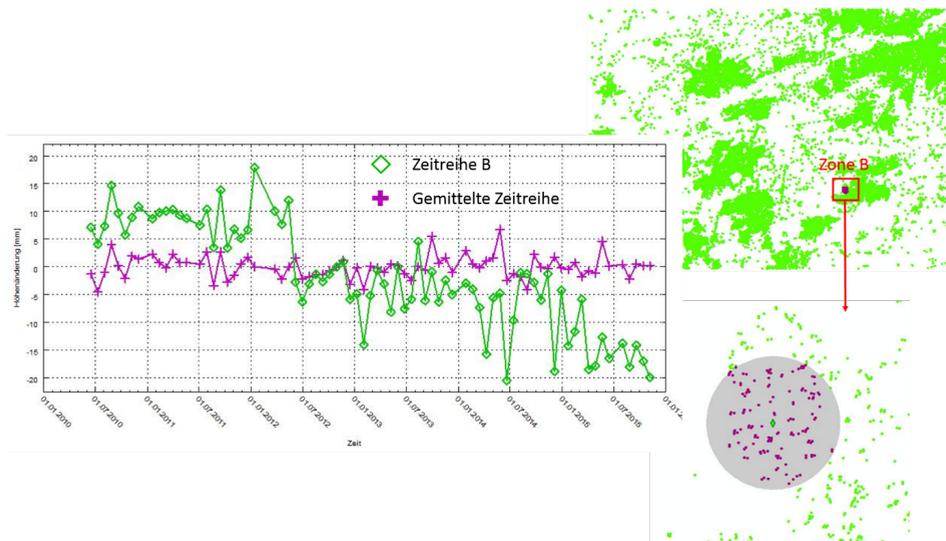


Abbildung 6: Gegenüberstellung der detektierten spatio-temporalen Anomalie B mit der gemittelten Zeitreihe benachbarter PS-Punkte.

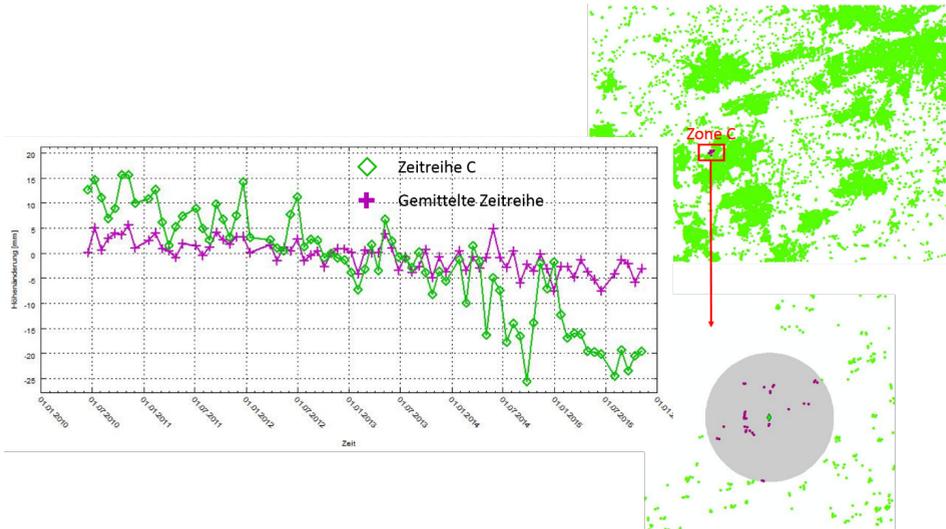


Abbildung 7: Abweichende Zeitreihe des Clusterpunktes C und gemittelte Zeitreihe benachbarter PS-Punkte.

ten weitere insgesamt 88 PS-Punkte mit abweichenden Höhenänderungsraten als spatio-temporale Anomalien entdeckt werden, deren räumliche Lage auch in Abbildung 4 (lila markierte Punkte) dargestellt ist.

Exemplarisch werden die Höhenänderungszeitreihen von zwei detektierten anomalen Clusterpunkten mit extrem auffälligen Höhenänderungsraten in Abbildung 7 und 8 (Zeitreihen C und D) mit den gemittelten Zeitreihen der PS-Punkte in ihren Nachbarschaften gegenübergestellt.

Die Abbildungen 7 und 8 bestätigen die detektierten Unterschiede der Höhenänderungszeitreihen der Clusterpunkte C und D gegenüber den gemittelten Zeitreihen ihrer benachbarten PS-Punkte. So zeigt die Zeitreihe C eine deutliche Senkung von etwa -30 mm über den gesamten Untersuchungszeitraum, während die gemittelte Zeitreihe eine Senkung von nur ca. -5 mm aufweist. Im Gegensatz dazu besitzen die Zeitreihe D und die gemittelte Zeitreihe der Nachbarn einen ansteigenden Höhenänderungstrend über den gesamten Untersuchungszeitraum; während die Zeitreihe D einen deutlichen Hebungstrend von über 15 mm aufweist, zeigt die gemittelte Zeitreihe der Nachbarn nur eine leichte Hebung.

Als letzter Schritt des entwickelten Clusterverfahrens erfolgt die Validierung der detektierten spatio-temporalen Anomalien. Anhand des genannten Validationskriteriums (s. Formel 6) sind die 245 detektierten spatio-temporalen Anomalien an PS-Punkten mit einem Signifikanzniveau von 5 % ($k = 1,96$) überprüft worden. Insgesamt ergaben sich 6 von 245 detektierten anomalen Zeitreihen als nicht signifikant. In den Abbildungen 9 ist exemplarisch eine Zeitreihe

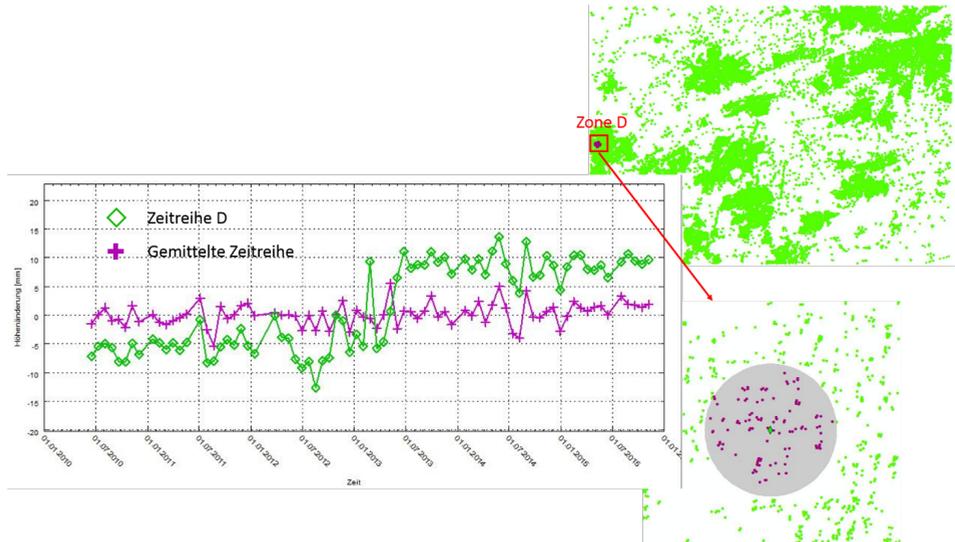


Abbildung 8: Abweichende Zeitreihe des Clusterpunktes D und gemittelte Zeitreihe benachbarter PS-Punkte.

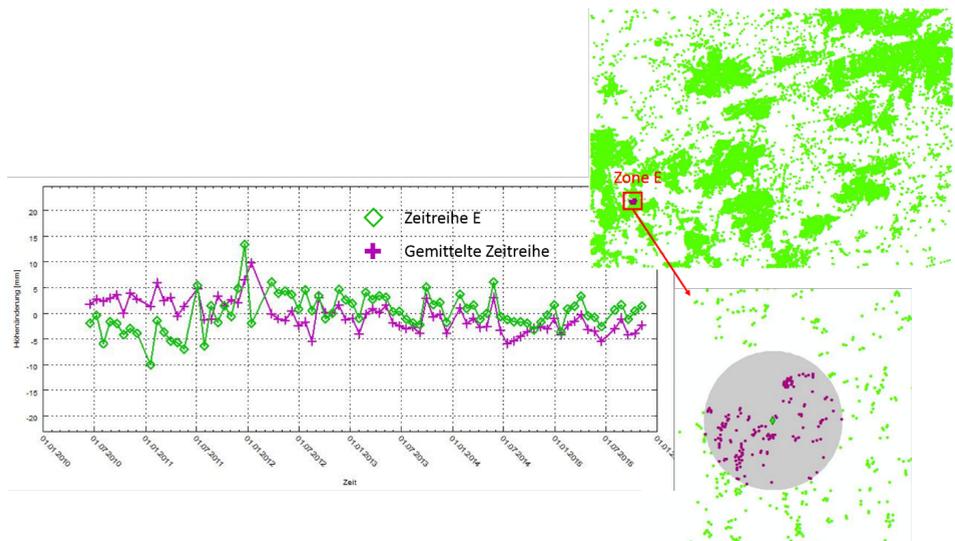


Abbildung 9: Gegenüberstellung der detektierten spatio-temporalen Anomalie E mit der gemittelten Zeitreihe benachbarter PS-Punkte.

(Zeitreihe E) dieser nicht signifikanten Anomalien im Vergleich mit der gemittelten Zeitreihe der benachbarten PS-Punkte dargestellt.

Ein visueller Vergleich der Höhenänderungszeitreihen in den Abbildungen 9 belegt die Richtigkeit dieser durchgreifenden Prüfung. Die Zeitreihe E zeigt keinen auffälligen Unterschied bezüglich ihres Höhenänderungsverhaltens im Vergleich zu ihrer gemittelten Nachbarzeitreihe, daher sollte der sich als nicht signifikant anomal erwiesene PS-Punkt E wie auch die anderen 5 detektierten PS-Punkte nicht als spatio-temporale Anomalie deklariert werden.

4. Zusammenfassung

Die spatio-temporalen Anomalien an PS-Punkten, die sich aufgrund verschiedener natürlicher, anthropogener und auch verfahrenstechnischer Ursachen deutlich von dem erwarteten Bodenbewegungsverhalten unterscheiden, sind nicht repräsentativ für die Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen oder im messtechnischen Sinne ggf. sogar grob falsch/Ausreißer). Vor einer weiteren Nutzung der PSI-Ergebnisse sollten daher zuerst diese auffälligen „Anomalien“ in den vorliegenden Massendaten automatisiert erkannt und von der nachfolgenden Interpretation des Bodenbewegungsverhaltens ausgeschlossen werden. Aufgrund der großen Datenmenge von PS-Punkten ist die Bestimmung von spatio-temporalen Anomalien nur mittels automatisierbarer Ansätze möglich, die gleichzeitig ihren raumzeitlichen Charakter zu berücksichtigen haben. Basierend auf dem Local-Moran's-Index-Clusterverfahren wird in diesem Beitrag ein neu entwickelter Prozessablauf zur Detektion spatio-temporaler Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung gezeigt (XI 2017).

Es zeigte sich, dass zur Beschreibung des charakteristischen Verlaufs einer Höhenänderungszeitreihe ein einziges Attribut offensichtlich nicht ausreicht. Deshalb erfolgt eine Modifikation dieses Verfahrens durch Einführung eines Gewichtungsfaktors zur Beurteilung und Quantifizierung der Ähnlichkeit der Höhenänderungsverläufe benachbarter PS-Punkte. Des Weiteren konnte anhand praktischer Anwendungen nachgewiesen werden, dass Anomalien trotz deutlich unterschiedlicher Attributwerte bei Anwendung des globalen Mittelwertes des betrachteten Attributes in einem lokalen Untersuchungsbereich anhand des Local-Moran's-Index-Clusterverfahrens nicht entdeckt werden können. Um solche spatio-temporale Anomalien auch erkennen zu können, wurde das modifizierte Local-Moran's-Index-Clusterverfahren um eine weitere kleinräumige Clusteranalyse ergänzt, die auf der statistischen Häufigkeitsverteilung des betrachteten Attributs von zuvor ermittelten Clusterpunkten innerhalb der Nachbarschaft beruht.

Abschließend wurde am Beispiel eines umfangreichen Testdatensatzes der entwickelte Prozessablauf des Clusterverfahrens zur Identifizierung von spatio-temporalen Anomalien an PS-Punkten erprobt und das Analyseergebnis mit einem entwickelten statistischen Validationsverfahren, basierend auf berechneten Höhenänderungsdifferenzen, überprüft.

Zusammenfassend zeigte sich, dass eine automatisierte Detektion von spatio-temporalen Anomalien bei der flächenhaften, radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung mittels des

neu entwickelten Clusterverfahrens zuverlässig erfolgen kann. Die hierdurch ermöglichte Datenbereinigung liefert einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Qualität einer flächenhaften Analyse und Modellierung von Bodenbewegungen.

Literatur

- ANSELIN, L. (1988): *Spatial Econometrics. Methods and Models*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- ANSELIN, L. (1995): Local Indicators of Spatial Association-LISA. In: *Geographical Analysis* 27 (2), pp. 93 – 115.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (Hrsg.) (2016): *Multivariate Analysemethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BUSCH, W., WALTER, D., COLDEWEY, W. G. & HEJMANOWSKI, R. (2016): *Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches*. Bergwerk Walsum der RAG AG. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld.
- CLARK, T. (1989): Managing Outliers: Qualitative Issues in the Handling of Extreme Observations in Marketing Research. In: *Marketing Research* (Vol. 1 Issue 2), pp. 31 – 48.
- HARTUNG, J., ELPELT, B. & KLÖSENER, K.-H. (1999): *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen. 12. Aufl. München: Oldenbourg.
- HAWKINS, D. M. (2004): *Outliers*. Band 6, *Encyclopedia of statistical sciences*. New York, Chichester: John Wiley & Sons.
- LEGENDRE, P. (1993): Spatial Autocorrelation. Trouble or New Paradigm? In: *Ecology* 74 (6), pp. 1659 – 1673.
- TOBLER, W. R. (1970): A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. In: *Economic Geography* 46, p. 234.
- XI, F., BUSCH, W. & ZHANG, C. (2015): Multikriterielle Clusteranalysen zur Detektion von Ausreißern in flächenhaft vorliegenden PSI-Ergebnissen zur Bestimmung von Bodenbewegungen. In: *Bergbau, Energie und Rohstoffe* 2015, 7. – 9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 209 – 220.
- XI, F. (2017): *Detektion von anomalen Zeitreihen an Persistent-Scatterer-Punkten im Zusammenhang mit der Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen*. Dissertation TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen.