



## Bodenbewegung aus der Sicht der Geologie und Geostatistik

### Ground movements as from the point of geology and geostatistics

Robert Marschallinger, Seekirchen

#### Kurzfassung

Boden- oder Massenbewegungen sind natürliche, durch die Schwerkraft induzierte und hangabwärts verlaufende Umlagerungen von Böden, Locker- und Festgesteinen. Bei der interdisziplinären Bearbeitung von Massenbewegungen spielt die Geostatistik eine wichtige Rolle zur Erstellung von 3D-Modellen des geologischen Substrats, bei der Optimierung des geodätischen Messprogrammes und bei der Homogenisierung der Daten aus verschiedenen Messverfahren. Der folgende Text soll einen Abriss der Anwendung geostatistischer Verfahren zur Verschiebungsmodellierung bei Massenbewegungen geben.

**Schlüsselwörter:** Massenbewegung, Geostatistik

#### Abstract

Mass movements are gravitationally induced rearrangements of soil, soft- and hard-rock. In the interdisciplinary handling of mass movements, geostatistics plays an important role at establishing geological 3D models, at optimizing displacement monitoring and at homogenizing data from diverse displacement sensors. This paper aims at giving an introduction to the use of geostatistical methods for modeling displacements in the context of mass movements.

**Keywords:** Mass movement, geostatistics

## 1. Massenbewegungen

Aus geologischer Sicht sind Bodenbewegungen dem Begriff *Massenbewegungen* unterzuordnen. Als Massenbewegungen werden natürliche Prozesse bezeichnet, bei denen schwerkraftbedingte Verlagerungen von Locker- bzw. Festgesteinen stattfinden – Massenbewegungen entstehen durch episodische oder permanente Veränderung des statischen Grenzgleichgewichts an Hängen oder Böschungen. Letztendlich sind Massenbewegungen eine natürliche Begleiterscheinung des Auf- und Abbauzyklus von Gebirgen, deren teils drastische Auswirkungen auf den menschlichen Lebensraum durch steigenden Siedlungsdruck und den Klimawandel immer deutlicher sichtbar werden. Es existiert bislang keine international gültige Klassifikation von Massenbewegungen. Ein weithin akzeptierter Vorschlag der UNESCO teilt Massenbewegungsprozesse nach den Verschiebungsgeschwindigkeiten in Kriechen, Gleiten/Rutschen, Fließen, Fallen/Stürzen und komplexe Prozesse ein.

**Kriechen:** mm pro Jahr bis mm pro Tag. Langfristige, nicht beschleunigende Bewegung, bruchlose Deformation des Substrats. Beispiele sind Bodenkriechen, Schuttkriechen oder Blockkriechen.

**Gleiten und Rutschen:** mm pro Jahr bis m pro Stunde. Bewegung läuft innerhalb dünner Scherzonen im Substrat ab. Beispiele sind Felsgleiten und Bodenrutschen.

**Fließen:** m pro Sekunde. Substrat hat hohen Wasseranteil. Beispiele sind Schlamm- oder Erdströme und Muren.

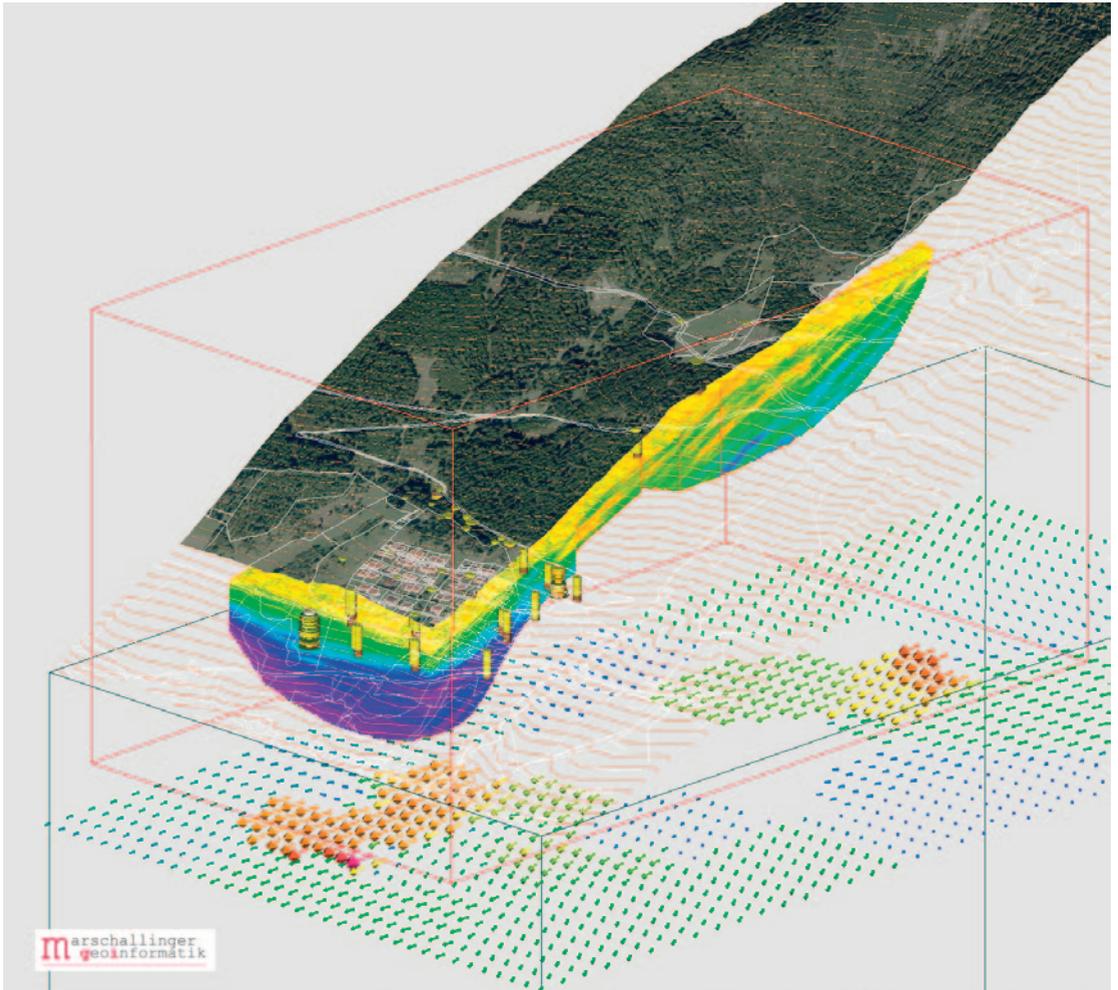
**Fallen/Stürzen:** mehr als 20 m pro Sekunde. Substrat verliert inneren Zusammenhalt. Beispiele sind Bergstürze, Felsstürze und Steinfall.

**Komplex:** Geschwindigkeit variabel, Kombination obiger Prozessstypen. Beispiele sind Talzuschübe oder Sackungen.

## 2. Geostatistik und Verschiebungsdaten

### 2.1 Grundlagen

Geostatistik ist eine mathematische Theorie und eine Sammlung von Algorithmen zur Analyse, stochastischen Modellierung und Simulation von räumlichen und raum-zeitlichen Daten in 2D, 3D und 2D+t. Stochastisch bedeutet im hiesigen Kontext die Einbeziehung von messtechnisch und geostatistisch-verfahrenstechnisch bedingtem „Rauschen“ in die Modellierung bzw. Simulation. Die Geostatistik liefert neben den Modellierungsergebnissen (z. B. xyz-Verschiebungskomponente



**Abb.1:** Integration geologischer und geodätischer Daten. Ansicht eines interaktiven geologischen 3D-Modells und kinematischen 2D+t-Modells der Massenbewegung Kerschbaumsiedlung/Tirol. Orthofoto mit abgedecktem 3D-Modell des geologischen Substrats und Kernbohrungen. Rote Bounding Box: Geostatistisches Voxelmmodell der Refraktions-Seismikgeschwindigkeiten. Graue Bounding Box: Geostatistisches Raum-Zeit Voxelmmodell der Gesamtverschiebungen mit an spezifizierbarem Datum extrahierten Bewegungsvektoren.

an nicht gemessenen Stellen) auch immer die assoziierte Modellgenauigkeit. Eine Schlüsselkomponente klassischer Geostatistik ist das Variogramm, mit dem räumliche oder raum-zeitliche Anisotropien quantifiziert werden können. Das empirische Variogramm berechnet sich wie folgt:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2n(\mathbf{h})} \cdot \sum_{i=1}^n ((z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h}))^2) \quad (1)$$

**Gleichung 1:**  $z(\mathbf{x})$  Wert der Variable  $z$  mit beliebiger Verortung  $\mathbf{x}$ , (hier z.B.: 3D Messlokation mit  $z =$  z.B. Verschiebungsbetrag, Geländehöhe, etc.);  $\mathbf{h}$  3D Distanz von Messpunkten (Einheiten z.B.: Meter);  $n(\mathbf{h})$  Anzahl der Messpunktpaare  $[z(\mathbf{x}), z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]$  innerhalb Distanzklasse  $\mathbf{h}$ ;  $\gamma(\mathbf{h})$  empirischer Variogrammwert für Distanz  $\mathbf{h}$ .

Berechnet man – beispielsweise für eine Massenbewegung - mehrere empirische Variogramme der Verschiebung in unterschiedliche Richtungen (z. B.: N-S, E-W, NE-SW, NW-SE), dann können die räumlichen Anisotropien des bewegten Bereiches quantifiziert werden.

Abbildung 2 zeigt empirische Variogramme der Bewegungsmessungen im Auslaufbereich der Gschlifgrabenrutschung (Horizontalkomponente). Das Variogramm in ENE-WSW Richtung – also in Richtung der Bewegungen – zeigt für die Horizontalkomponente deutlich größere Reichweite und geringere Varianz als das Variogramm in NNW-SSE Richtung. Im gegebenen Kontext ermögli-

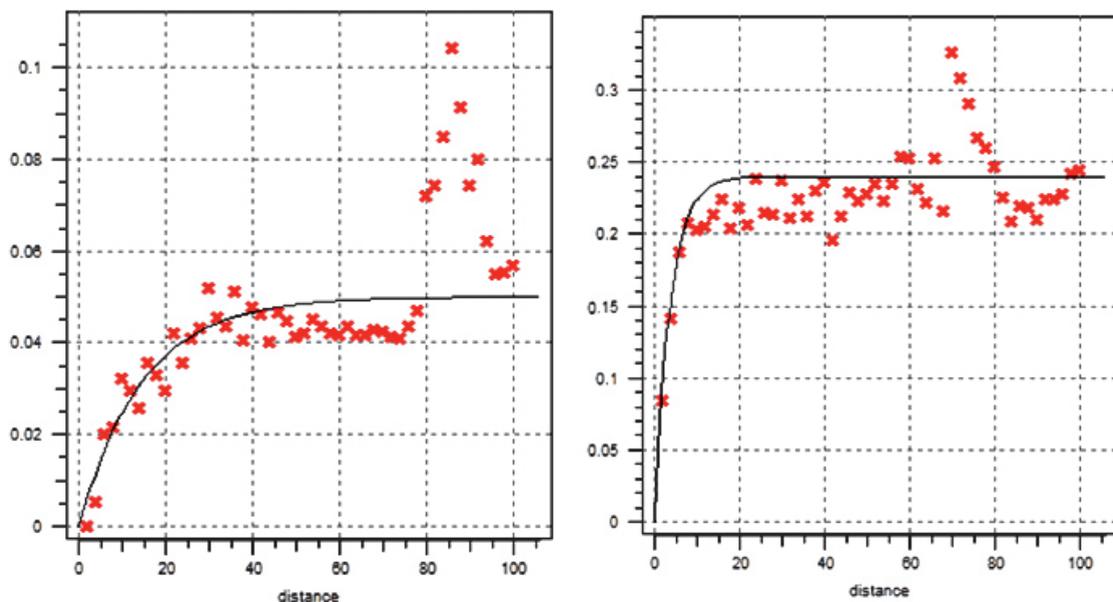


Abb.2: Empirische Variogramme (rote Kreuzsignatur) und angepasste Modellfunktionen (exponentielles Modell, schwarze Linien) in ENE-WSW Richtung (links) und NNW-SSE Richtung (rechts). Horizontalkomponente der Verschiebung, Gschlifgraben-Rutschung.

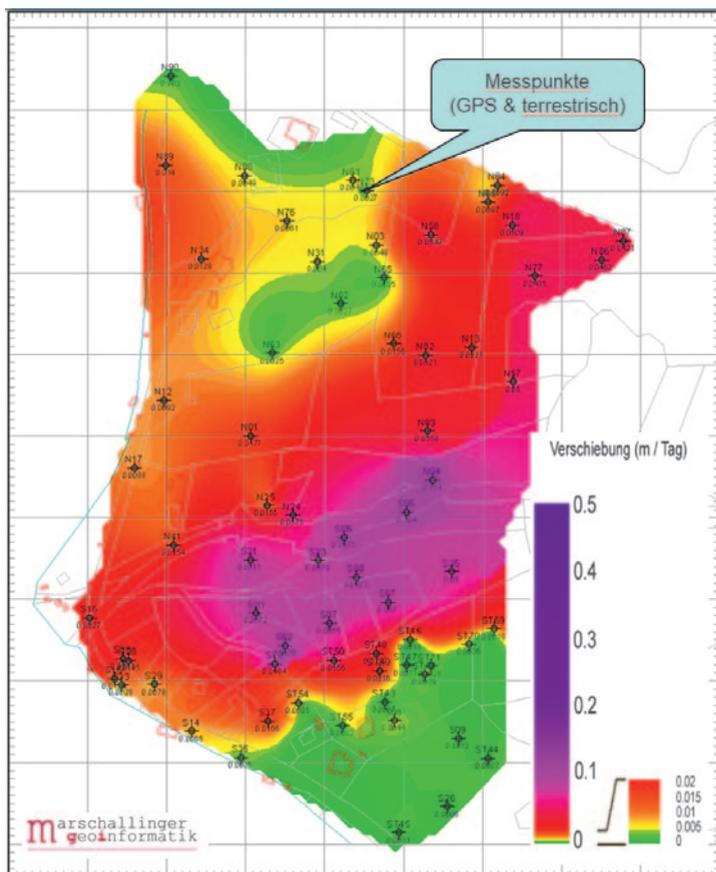


Abb.3: Geostatistische Modellierung der Horizontalverschiebung  $dx_y/\text{Tag}$ , Gschlifgraben-Rutschung. Siehe Text.

chen empirische Variogramme eine nachvollziehbare Lageoptimierung von Messpunkten und - über Variogramm-Modellfunktionen (vgl. Abbildung 2) – die Einbeziehung der Variogramm-Information in die geostatistische Modellierung oder Simulation.

In Abbildung 3 zeigt das Ergebnis geostatistischer Modellierung der Horizontalkomponente  $dx/y/Tag$  für den Auslaufbereich der Gschlifgraben-Rutschung. Aus den Eingangsdaten – Tachymeterdaten und GPS-Messungen – wurde mit geostatistischem Kriging (Universal Kriging Algorithmus) die flächige Verteilung der horizontalen Bewegungsmagnitude berechnet. Die in den Variogrammen (Abbildung 2) dargestellte Anisotropie bildet sich auch im Kriging-Modell deutlich ab.

**2.2 Datenintegration und Homogenisierung**

Zur Dokumentation der Verschiebungen bei Massenbewegungen kommen im einzelnen Projekt häufig unterschiedliche Datenerfassungsmethoden zum Einsatz – beispielsweise manuelle oder automatisch registrierende, Punktdaten liefernde Geräte wie z. B. Tachymeter, Totalstationen oder GPS-Empfänger bzw. Rasterdaten liefernde Verfahren wie terrestrische/airborne Laserscanner, Bildflüge (Drohnen) zur Erstellung von Orthobildern

bzw. terrestrische, airborne oder satellitenbasierte Radarverfahren. Die erwähnten Methoden liefern räumliche Daten mit unterschiedlicher Genauigkeit bzw. in variabler räumlicher und zeitlicher Auflösung. Im Kontext von Massenbewegungen kommt der Geostatistik eine Integrations- und Homogenisierungsrolle zu: es müssen ja Daten mit unterschiedlicher Erfassungsgenauigkeit und variabler räumlicher und zeitlicher Auflösung in einem konsistenten Bewegungsmodell abgebildet werden. Hier kommt die Raum-Zeit Geostatistik (2D+t) zum Einsatz, welche die Zeit auf die Z-Koordinate abbildet.

Als Bezugsrahmen dient ein Raum-Zeit Prisma, in dem oberflächenbezogene Zeitreihendaten abgebildet und dann geostatistisch homogenisiert werden können. Abbildung 4 zeigt das Raum-Zeit Prisma für die Horizontalkomponente der Gschlifgraben-Rutschung. X und Y Koordinatenachsen beziehen sich auf Rechts- und Hochwert in Metern, die Z-Koordinate bildet die Zeit ab, hier in Tagen seit Beobachtungsbeginn. In Abbildung 4 sind die Vermessungsdaten raum-zeitlich richtig dargestellt und farbzoniert (m/Tag). Mehr oder weniger stabile Messpunkte bilden sich als mehr oder weniger senkrechte graue oder blaue

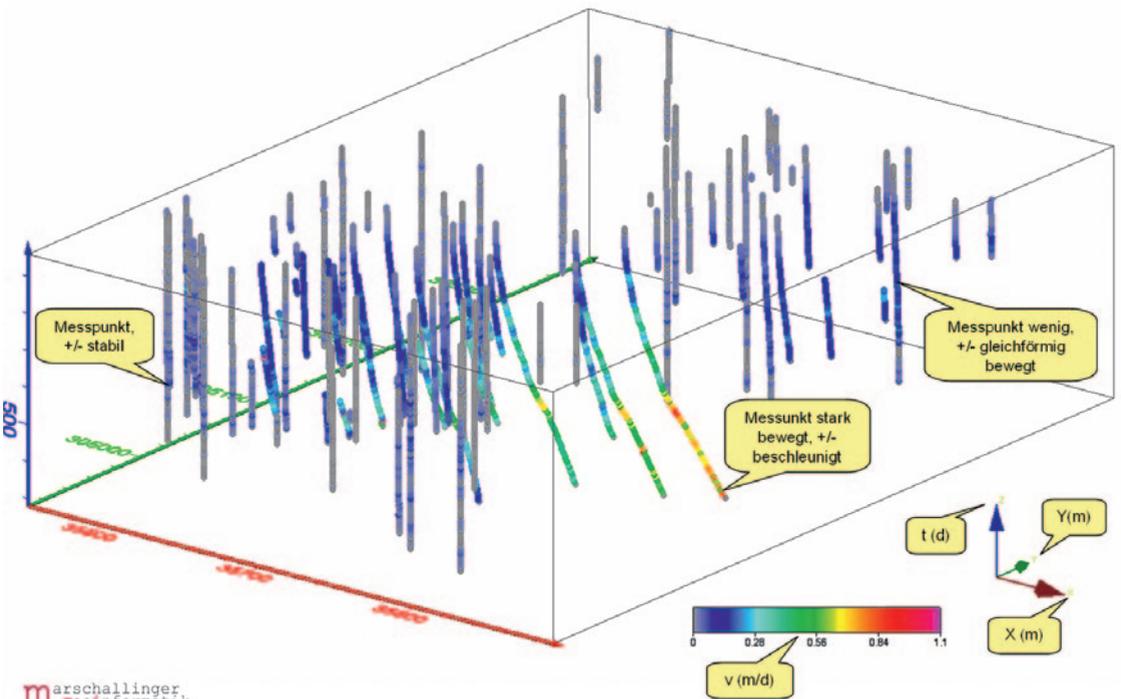
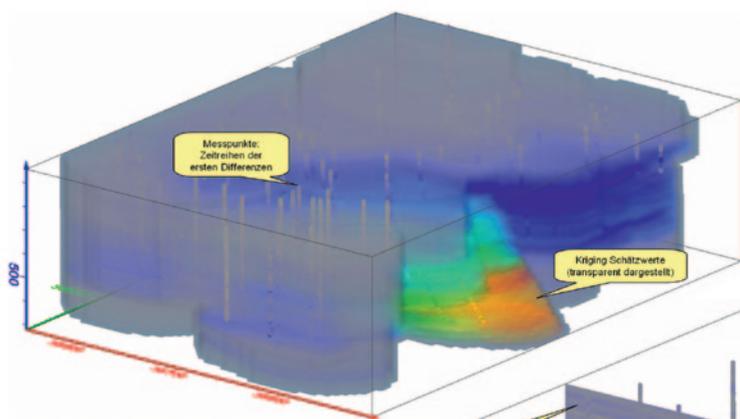


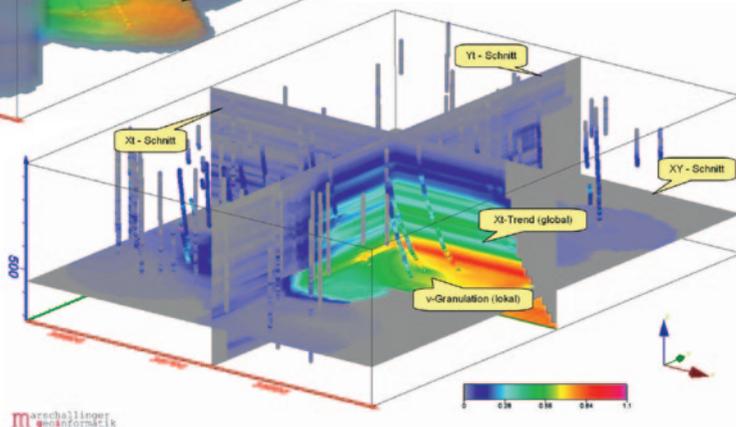
Abb.4: Raum-Zeit Prisma mit Horizontalverschiebungen  $dx/y$  (m/Tag) aus Tachymeter- und GPS Punktmessungen, Gschlifgraben-Rutschung. Siehe Text.



**Abb.5:** Voxelmodell mit Kriging-Ergebnissen, Verschiebungen  $m/Tag$ , Gschlifegraben-Rutschung. Siehe Text.

Marschallinger  
Geoinformatik

**Abb.6:** Schnitte durch das Voxelmodell in Abbildung 4, Verschiebungen  $m/Tag$ , Gschlifegraben-Rutschung. Siehe Text.



Linien ab. Stärker bewegte Vermessungspunkte werden entsprechend des zeitlichen Verlaufes der Magnitude in Bewegungsrichtung verkrümmt und in hellblauer bis roter Farbe abgebildet. Nachdem das Variogramm des Raum-Zeit Bezuges mit unterschiedlichen Datenniveaus arbeiten muss (Meter in  $xy$ -, Tage in  $z$ -Richtung), kommt hier ein Raum-Zeit Variogramm zum Einsatz. Mit 3D-Kriging können dann die Ergebnisse unterschiedlicher Messverfahren im Raum-Zeit Prisma homogenisiert werden.

Durch 3D-Kriging oder geostatistische 3D-Simulation entsteht ein Voxelmodell, das eine synthetische Raum-Zeitreihe in den euklidischen  $(x,y,z)$  Raum abbildet. Diese ist nun unabhängig von räumlicher Lage und zeitlicher Einordnung („Epoche“) der Messdaten und auch von der Lage- und Messwert Auflösung der verschiedenen Messverfahren. Jedes Voxel beinhaltet neben dem Modellwert (Abbildung 5:  $xy$ -Verschiebung pro Tag) auch die lokale Modellgenauigkeit. Das Voxelmodell kann nun sehr flexibel weiter verarbeitet werden (Abbildung 6). Beispielsweise können für Massenbilanz-Szenarien Subvolumina mit definierbarer Verschiebungsgeschwindigkeit isoliert werden. Zur Verdeutlichung des Bewegungsablaufes einer Rutschung können aus dem

Voxelmodell  $xy$ -Schnitte in definierten Inkrementen extrahiert werden, die dann direkt als *frames* in eine Animation einfließen.

### 2.3 Zusammenfassung

Die klassische Geostatistik bietet einen flexiblen Rahmen für Analyse, Modellierung und Simulation von Geodäsie-Daten im Zusammenhang mit verschiedenen Typen von Massenbewegungen. Die Variografie ermöglicht durch die quantitative Erfassung der Anisotropien im Bewegungsbild eine räumliche und zeitliche Optimierung der Datenerfassung. Geostatistische Modellierung und Simulation sind die Basis für die Erstellung homogener, synthetischer Zeitreihen der Verschiebungen, die - im Gegensatz zu deterministischen Verfahren - neben den Schätzwerten auch deren Standardabweichungen beinhalten.

Allgemeine Informationen zu Massenbewegungen, Geologische Bundesanstalt:

[https://www.geologie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/dokumente/pdf/service/webapplikation/allgemeine\\_info\\_mass\\_end\\_h.pdf](https://www.geologie.ac.at/fileadmin/user_upload/dokumente/pdf/service/webapplikation/allgemeine_info_mass_end_h.pdf)

#### Anschrift des Autors

Univ.DoZ. Dr. Robert Marschallinger, Marschallinger Geoinformatik, Fischtagging 87, 5201 Seekirchen.

E-Mail: [office@marschallinger.eu](mailto:office@marschallinger.eu)