

SedInOut

*Entwicklung einer Methodik zum Risk-Management
durch standardisierte Abschätzung des
Sedimenteintrages von Massenbewegungen im
Gebirgsbereich*

Photogrammetrie- basierte Korngrößenanalysen (WP 4)

Thomas Geisler¹, Thomas Marcher¹, Franz Goldschmidt²

¹Technische Universität Graz – Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

²Land Kärnten

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund	3
2. Photogrammetrische Korngrößenverteilung	4
2.1 Einleitung	4
2.2 Methodik	4
2.2.1 Drohnenbefliegung und Datengenerierung	4
2.2.2 Modellierung und Siebkurvenerstellung	5
2.3 Ergebnisse	7
2.4 Interpretation	9
2.5 Schlussfolgerungen	12
3. Remobilisierung von Schuttfächern	13
3.1 Methodik	13
3.1.1 Modellerstellung	13
3.1.2 Korngrößenverteilung und Form der Partikel	14
3.1.3 Modellierung des untersuchten Gebiets	15
3.1.4 Kalibrierung, Auswahl der Mikroparameter und Skalierung	16
3.1.5 Modellierung der Remobilisierung	16
3.2 Ergebnisse	19
3.2.1 Felssturz	19
3.2.2 Extremniederschläge	20
3.2.3 Seismizität	21
3.3 Interpretation und Schlussfolgerungen	22
Danksagung	22
Appendix	23

1. Hintergrund

Im Zuge des Projektes SedInOut wurden charakteristische Schuttfächer am Wasserradkopf mit einer Drohne befliegen. Im Anschluss an die Drohnenbefliegung wurden die Schuttfächer mittels photogrammetrischer Methoden hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung untersucht.

Diese Korngrößenverteilung wird in einem weiteren Schritt als Eingangsparameter für eine numerische Modellierung inklusive Stabilitätsuntersuchung verwendet.

Der vorliegende Bericht ist in zwei Teile unterteilt.

Im ersten Abschnitt des Berichtes wird die Methodik der photogrammetrischen Korngrößenermittlung präsentiert. Im zweiten Abschnitt wird die numerische Modellierung der Schuttfächer beschrieben. Diese Untersuchungen zielen darauf ab, die Stabilität und das Remobilisierungspotential der Schuttfächer zu evaluieren.

2. Photogrammetrische Korngrößenverteilung

2.1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts SedInOut wurden digitale Bildaufnahmen an charakteristischen Schuttfächern am Wasserradkopf mittels einer Drohne durchgeführt, um sie anschließend mittels Photogrammetrie auf die Korngrößenverteilung des Schuttmaterials hin zu untersuchen. Eine Photogrammetrie-basierte Korngrößenermittlung kann notwendig sein, wenn das Gelände zu exponiert ist und/oder herkömmliche Korngrößenbestimmungsmethoden (z.B. Siebanalyse) nicht praktikabel sind. Darüber hinaus ermöglicht die Methodik Korngrößenanalysen in einem sicheren Rahmen (ohne die Gefährdung von Mensch und Maschine) durchzuführen.

Für die photogrammetrische Analyse wurde das Softwarepaket *ShapeMetriX* der Firma 3GSM GmbH¹ verwendet. Dieses Softwarepaket beinhaltet u.a. das Analysetool *Fragmenter*. Die Software wird bereits erfolgreich in der Bergbauindustrie eingesetzt. Sie könnte aber auch in Zukunft an Schuttfächern zum Einsatz kommen, weshalb im Zuge des Projekts erste Untersuchungen dazu stattfanden.

2.2 Methodik

2.2.1 Drohnenbefliegung und Datengenerierung

Je nach Verwendungszweck der Daten bestimmen mehrere Faktoren die erreichbare Genauigkeit. Neben einer effektiven Flugplanung sind die Auswahl einer geeigneten Kamera, der Flugweg, die Wetterbedingungen und die Drohne (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*) von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich ist die zu erreichende Genauigkeit an die Bodenauflösung (*Ground Sampling Distance, GSD*) oder den Abtastabstand gebunden. Objekte, die kleiner sind als die Bildauflösung, können nicht erfasst werden, so dass die erreichbare Genauigkeit in dieser Richtung deutlich begrenzt ist. Um die größtmögliche Genauigkeit zu erreichen, wurden bei der Flugplanung die von Tscharf 2020² definierten Einflussfaktoren berücksichtigt. Dazu zählen die folgenden Parameter:

¹ 3GSM GmbH. 3GSM GmbH. Available online: <https://3gsm.at/de/> (accessed on 28 November 2022.587Z)

² Tscharf, A. UAV-gestützte Vermessung im Bergbau – Zur Frage der Genauigkeit unter Verwendung von Structure from Motion. *Berg Huettenmaenn Monatsh* **2020**, 165, 274–283, doi:10.1007/s00501-020-00988-x.

- Flughöhe
- Überlappung Querrichtung
- Überlappung Längsrichtung
- Blickwinkel relativ zum Objekt
- Passpunkte (im Falle von vermessungstechnischen Anwendungen).

Für eine bestmögliche Umsetzung wurde die Befliegung nach den Handlungsempfehlungen von Tscharf (2020) durchgeführt.

- Bildaufnahmen aus großen Höhen übt sich positiv auf die Genauigkeit der Aufnahmen aus
- Hohe Bildüberlappungen in beide Richtungen übt einen stabilisierenden Effekt auf die Bildaufnahme aus
- Eine schräge Ausrichtung der Aufnahmeachse übt sich stabilisierend auf die Gesamtaufnahme aus
- Ausreichende Kamerabewegung und Variation der Bilder und Aufnahmepositionen
- Kombination verschiedener Positionen

2.2.2 Modellierung und Siebkurvenerstellung

Zu Beginn wird mit den von der Drohne aufgenommenen Bildern ein 3D-Modell erstellt, welches dem Fragmenter Tool als Input-Datei dient. Nach dem Einstellen der Auswertungsparameter erstellt das Programm eine Korngrößenanalyse des betrachteten Gebiets.

Innerhalb des Programms gibt es verschiedene Einstellungsmöglichkeiten. Die Auswertung kann manuell oder automatisiert vonstattengehen, was auch die Sensitivität der Analyse beeinflusst. Bei der automatisierten Auswertemöglichkeit gibt es wiederum zwei Modi, „RipRap“ und „Blast“ (**Abbildung 1**). Laut Hersteller eignet sich der Modus „Blast“ für heterogen verteilte Korngrößen und der Modus „RipRap“ für homogen verteilte Korngrößenzusammensetzungen.

Diese softwarebasierten und automatisch erstellten Analysen können im Anschluss manuell nachbearbeitet werden. Zudem besteht die Möglichkeit die Analyse komplett manuell (Einzeichnen der einzelnen Fragmente) durchzuführen.

Um die Sensitivität der einzelnen Auswertemodi zu vergleichen, wurden drei repräsentativen Bereiche (**Abbildung 2**) manuell kartiert. Hierzu wurden 10x10 m große Netze auf dem

Schuttfächer aufgelegt und jeweils alle 50cm (in x und y Richtung) Gesteinsproben abgemessen
(Abbildung 3). Im Anschluss wurden diese Ergebnisse digitalisiert.

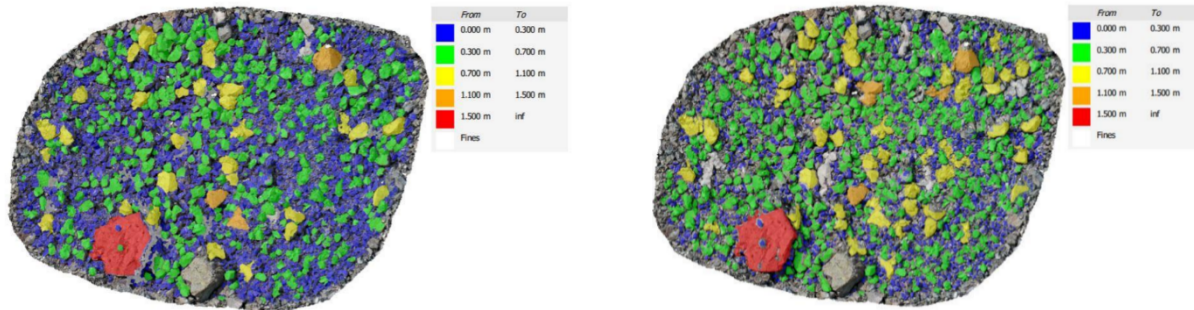


Abbildung 3. Automatische Auswertung des Felds 2 im Modus Blast (links) und im Modus RipRap (rechts).



Abbildung 2. Überblicksaufnahme des Schuttfächers; Eingrenzung der vor Ort kartierten Stellen mittels roter Rechtecke; Nummerierung der Modelbereiche.



Abbildung 1. Aufgelegtes Messnetz innerhalb von Modelbereich 3.

Mit den softwarebasierten Analysen und den Analysen, welche auf den Kartierungen vor Ort beruhen, wurden Vergleiche zur Sensitivität angestellt.

2.3 Ergebnisse

Die Vergleiche (**Abbildung 4**) der automatisierten Auswertung von Feld 1 zeigen eine hohe Übereinstimmung der im Gelände manuell gemessenen Korngrößen mit dem automatischen Auswertemodus „RipRap“. Zudem ist ersichtlich, dass im Modus „Blast“ große Abweichungen von den manuell ermittelten Korngrößen im Feinkornbereich ausgewiesen werden.

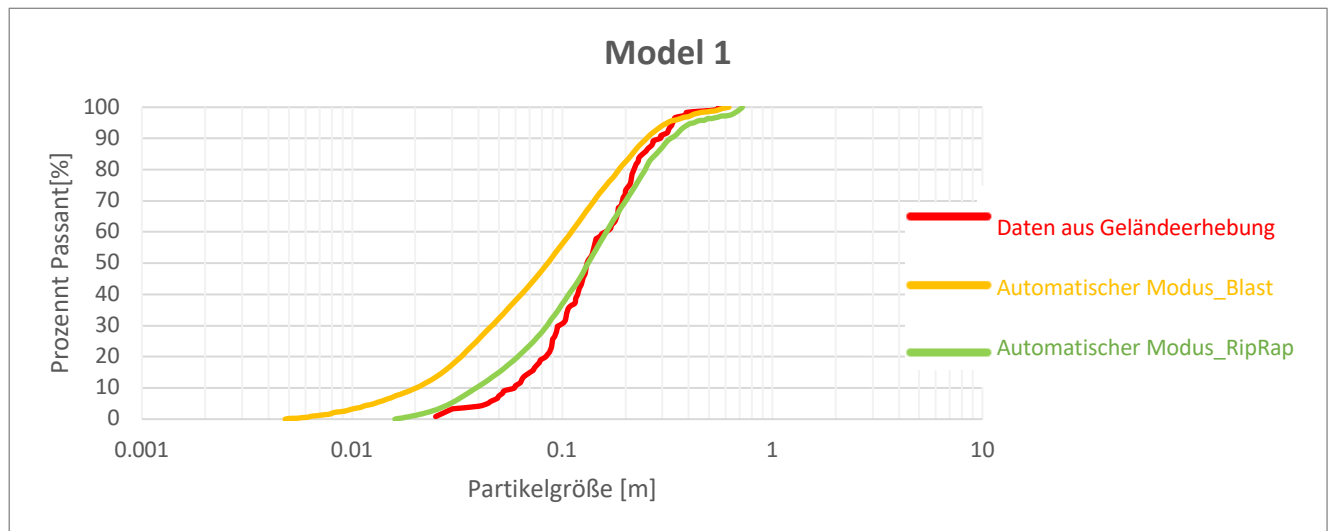


Abbildung 4. Vergleich der Daten in Modellbereich 1.

Die Vergleiche (**Abbildung 5**) in Modellbereich 2 zeigen eine Überschätzung der Korngrößenanteile in allen Bereichen bei der automatisierten Auswertung. Die größten Übereinstimmungen mit den vor Ort ermittelten Korngrößenanteilen liefert die automatisierte Auswertung im Modus „Blast“.

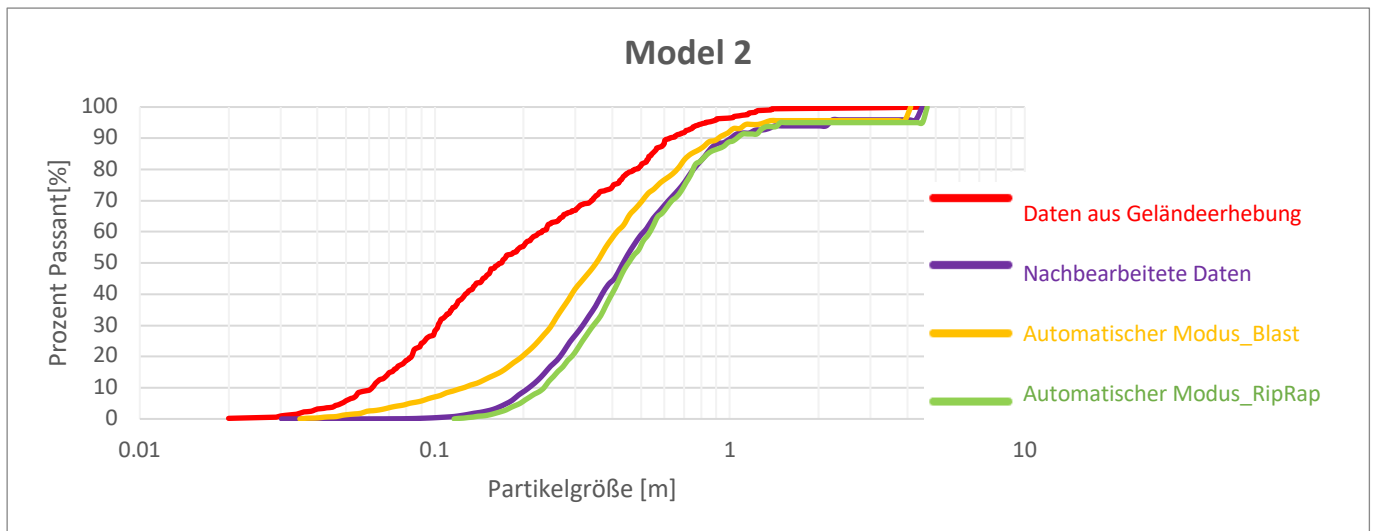


Abbildung 5. Vergleich der Daten in Modellbereich 2.

Die Vergleiche in Modellbereich 3 (**Abbildung 6**) zeigen die höchste Übereinstimmung der Auswertemethode im Modus „RipRap“ mit den manuell ermittelten Verteilungen. Generell werden die Korngrößen von beiden Auswertemethoden unterschätzt.

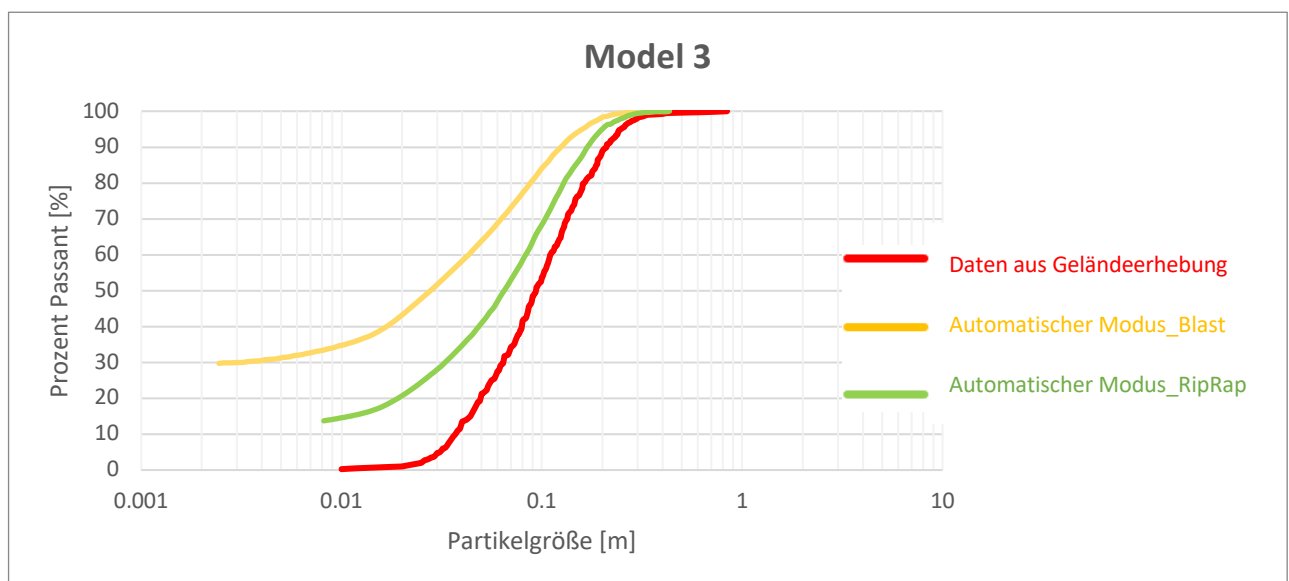


Abbildung 6. Vergleich der Daten in Modellbereich 3.

2.4 Interpretation

UAV- gestützte Analysemethoden können nur all jene Anteile detektieren, die an der Oberfläche aufgezeichnet werden. Daraus ergeben sich die Unterschiede in Bezug auf die Sensitivität. Da die Gesteinsfragmente in Schuttkegeln oft richtungsabhängig angeordnet sind, ist es möglich, dass bestimmte Abschnitte einzelner Fragmente teilweise verdeckt sind. Erfahrungen aus anderen photogrammetrie-basierten Untersuchungen zeigen, dass die Einsetzung von photogrammetrischen Methoden in einer generellen Unterschätzung der Korngrößen resultiert. Dies liegt daran, dass die Gesteinsfragmente oftmals gerichtet bzw. eingeregelt (zum Beispiel durch Imbrikation) vorliegen. Dies lässt sich auch im Modellfeld 3 beobachten (**Abbildung 7**). Dabei ist zu beachten, dass heterogene Bereiche in den Schuttkegeln (kleinere Korngrößen) von der Software erkannt werden, während sie bei der angewandten Methode (manuelle Messung einzelner Partikel) unerkannt bleiben, da die Feinfraktion räumlich ungleichmäßig verteilt ist. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache würde der Anteil der Feinfraktion bei der endgültigen Berechnung der Korngrößenverteilung zunehmen, wodurch sich die Korngrößenkurven einander annähern und ein hohes Maß an Übereinstimmung erreicht wird.



Abbildung 7. Foto im Bereich des Modellbereichs 3. Heterogenes Korngemisch.

Der Vergleich (**Abbildung 8**) des Modelbereiches 1 zeigt eine hohe Übereinstimmung der vor Ort gemessenen Korngrößen mit dem automatischen Bestimmungsmodus "RipRap", während der automatische Auswertungsmodus "Blast" die Korngrößenverteilung unterschätzt (die vor Ort gemessene Korngrößenverteilung wird als Referenz genommen). Ein Lokalaugenschein im Untersuchungsgebiet zeigt eine homogene Kornverteilung, welche fast ausschließlich aus grobem Oberflächenschutt besteht. Dies könnte der Grund dafür sein, dass der automatische Bestimmungsmodus "RipRap" (empfohlener Modus für homogene Korngrößenverteilungen) die besten Ergebnisse liefert.



Abbildung 8. Foto im Bereich des Modellbereichs 1. Homogenes Korngemisch.

Den Analysen aus Modellbereich 2 ist zu entnehmen, dass es zwischen der manuell erstellten und der Analyse mittels „RipRap“-Modus hohe Übereinstimmungen gibt. Vor Ort konnte man im Bereich des Modellfeldes 2 ein heterogenes Korngemisch vorfinden (**Abbildung 9**). Die Auswertungen zeigen eine Überschätzung der von der Software erstellten Korngrößenverteilung. Der Bereich reicht hier vom Zentimeter bis in den hohen Meterbereich. Gerade in Bereichen mit großen Blöcken werden oftmals kleinere Fragmente von den größeren Fragmenten komplett abgedeckt. Somit können die kleinen Fragmente oftmals nicht von der Software detektiert werden (im Gegensatz zur manuellen Aufnahme vor Ort). Diese Tatsache könnte eine mögliche Ursache für die hohe Diskrepanz zwischen Geländeerhebungen und software-basierten Analysen sein.



Abbildung 9. Foto des Modellbereichs 2. Heterogenes Korngemisch.

2.5 Schlussfolgerungen

Da die Gesteinsfragmente von Schuttfächern oft richtungsabhängig positioniert sind, ist es möglich, dass Abschnitte der einzelnen Fragmente dadurch teilweise verdeckt werden. Eine Photogrammetrie-basierte Korngrößenanalyse könnte daher in eine Unterschätzung der Korngrößenverteilung resultieren. Das Ergebnis der hier vorgestellten Flächen zeigt teilweise eine Unterschätzung der Korngrößenverteilungen, insbesondere für die Feinanteile, was durch den Effekt der Überdeckung erklärt werden kann. Grundsätzlich muss erwähnt werden, dass der Trend der Korngrößenentwicklung an steilen Hängen den Gesetzen der Gravitation unterliegt (Sortierung vom proximalen zum distalen Bereich). Hinzu kommt, dass in Schuttfächern (insbesondere in heterogenen Gebieten) kleinere Partikel von der Software erkannt werden, während sie bei der angewandten Methode (manuelle Messung der einzelnen Partikel) unerkannt bleiben, da der Feinanteil räumlich nicht gleichmäßig verteilt ist. Berücksichtigt man dies, so würde sich der Feinanteil erhöhen und damit die Kornkurven einander annähern und eine noch höhere Konformität erreicht werden. Außerdem muss bei der Interpretation der software-basierten Kornkurven ein besonderes Augenmerk auf die Geometrie der Klasten gelegt werden. Zum Beispiel werden besonders plattige Klasten von der Software nicht richtig erkannt, was in einer Überschätzung der Korngrößenverteilung resultiert.

Zudem ist hervorzuheben, dass UAV-basierte Methoden keine Informationen über die Zusammensetzung in der Tiefe liefern. Daher sollte zusammen mit der Bewertung ein erster Eindruck gewonnen werden, zumindest vor Ort oder anhand von Fotos, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse zuverlässig sind. Daher sind geländegestützte Korngrößenanalysen für eine erfolgreiche Tarierung (und damit einer akkuraten Beschreibung des Korngrößenverhältnisses zwischen der Oberfläche und dem Untergrund) essenziell.

UAV-gestützte Korngrößenanalysen sind praktikabel und bieten eine effiziente Alternative zu herkömmlichen Korngrößenbestimmungen, die mitunter Einschränkungen aufweisen. Zu diesen Einschränkungen gehört beispielsweise, dass keine Informationen über die Korngrößenverteilung in der Tiefe gewonnen werden. Insbesondere für abgelegene oder exponierte Gebiete, in denen eine Korngrößenanalyse nicht möglich ist, bietet die UAV-gestützte Korngrößenanalyse eine hervorragende Alternative.

3. Remobilisierung von Schuttfächern

Schuttfächer enthalten oft enorme Mengen an Sedimenten, die sich in einem fragilen Gleichgewicht befinden. Äußere Einflüsse wie extreme Wetterereignisse, Felsstürze oder seismische Ereignisse können das Gleichgewicht dieser Sedimentansammlungen stören. Durch die numerische Modellierung von Schuttfächern und die Simulation äußerer Einflüsse mit unterschiedlicher Intensität konnte die Sensitivität der Stabilität von Schuttfächern bestimmt und Rückschlüsse auf das Gefahrenpotenzial gezogen werden.

3.1 Methodik

Für die Bestimmung des Gefahrenpotenzials eines Schuttfächers wurde die Software PFC2D³ verwendet. Mit ihr lässt sich das Verhalten von Schuttfächern unter einer Vielzahl von Bedingungen simulieren. Das diskrete System von PFC2D, das aus regelmäßigen oder unregelmäßigen Partikeln besteht, kann die Wechselwirkung zwischen den Körnern simulieren. Die Partikel interagieren durch Normal- und Scherfedern, die sich entsprechend den Kräften und Momenten, die auf das Zentrum der Partikel wirken, verschieben, drehen und ihre Position verändern können. Die Partikel können mit Hilfe von Kontaktmodellen gebunden oder ungebunden sein, wodurch ein linear elastisches Verhalten simuliert wird. Mit einigen Vereinfachungen ist es so möglich, einen ersten Eindruck von der Stabilität von Trümmeransammlungen zu erhalten.

3.1.1 Modellerstellung

In der Simulationssoftware sind die Partikel bei 2D-Modellen in der Regel scheibenförmig und bei 3D-Modellen kugelförmig. Um die unregelmäßigen Geometrien des Schuttfächers zu simulieren, können scheibenförmige und kugelförmige Partikel die geometrischen Anforderungen nicht erfüllen. Daher werden "Klumpen" verwendet. Ein einzelner Klumpen ist eine starre Ansammlung von scheiben- oder kugelförmigen Partikeln und kann daher eine individuelle Form eines Partikels anhand einer beliebigen Vorlage beschreiben. Klumpen sind somit ein geeigneter Repräsentant für die Partikel eines Schuttfächers, da sie sich bewegen und drehen können und den Bewegungsgleichungen gehorchen. Darüber hinaus können die Oberflächeneigenschaften eines Klumpens unabhängig für jedes Teilchen angegeben werden.

³ PFC | US Minneapolis - Itasca Consulting Group, Inc. Available online: <https://www.itascacg.com/software/pfc> (accessed on 28 November 2022.906Z).

3.1.2 Korngrößenverteilung und Form der Partikel

Zu Beginn muss die Partikelgröße und -verteilung ausgewählt werden. Zu diesem Zweck wurde die Korngrößenverteilung des Schuttfächers (vgl. *Kapitel 2*) als Eingabe verwendet. Nach der Bestimmung der Partikelgröße und ihres prozentualen Anteils wurde die Geometrie jedes Partikels mit einem CAD-Programm gezeichnet, entsprechend der Partikelform von Proben oder Fotos des Schuttfächers. Anschließend wurde die Geometrie in die Software importiert, um die Klumpenvorlage zu erstellen. Schließlich wurde die Partikelverteilung entsprechend dem Prozentsatz der Partikel erstellt (**Abbildung 10**).

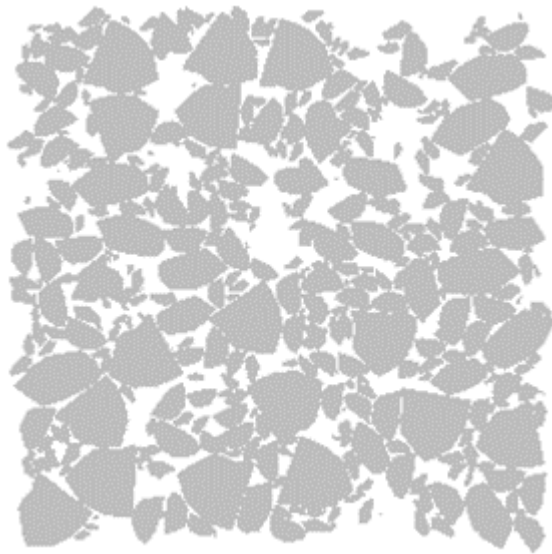


Abbildung 10. Korngrößenverteilung und Kornformen.

3.1.3 Modellierung des untersuchten Gebiets

Zur Bestimmung der Geometrie des Schuttfächers wird eine GIS-Software verwendet. Zunächst wird ein Querschnitt in Längsrichtung des Schuttfächers erstellt. Daraufhin wird eine Linie parallel zur größten Neigung und eine Linie parallel zur kleinsten Neigung konstruiert, um Informationen über die Mächtigkeit des Schuttfächers zu erhalten. Durch das Schneiden dieser beiden Linien kann die Mächtigkeit des Schuttfächers sowie seine Tiefenbegrenzung abgeschätzt werden.

Abbildung 11 zeigt, dass die dickste Stelle des Schuttfächers etwa 25 Meter beträgt und die Länge und Höhe 140 bzw. 120 Meter betragen. In einem nächsten Schritt werden die simulierten Partikel in den Hang exportiert, um das endgültige Modell zu erstellen (**Abbildung 12**).

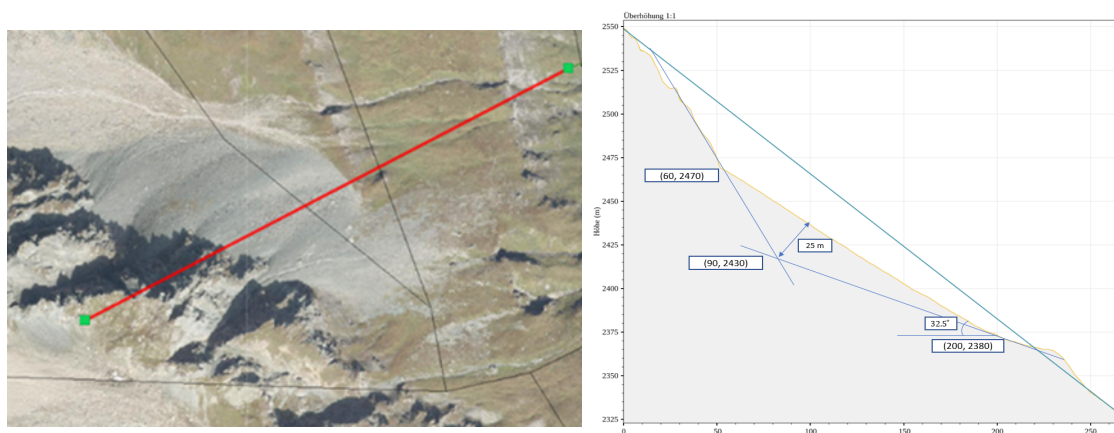


Abbildung 11. Bestimmung der Geometrie des Schuttfächers.

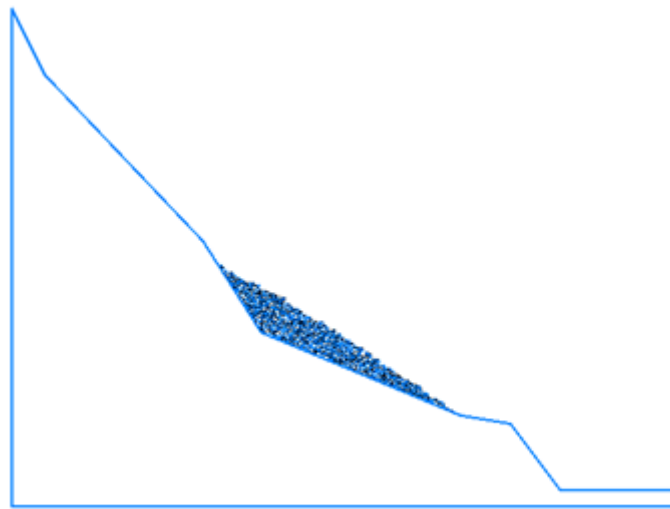


Abbildung 12. Finales Produkt der Schuttfächermodellierung.

3.1.4 Kalibrierung, Auswahl der Mikroparameter und Skalierung

Informationen über den Grenzzustand des Schuttfächers wurden durch die Anwendung der "Trial-and-Error"-Methode in Kombination mit der Literatur gewonnen. Durch die Verwendung verschiedener Werte für die Mikroparameter (Porosität = 8 [%], Dichte = 2500 [kg/m³], Reibungskoeffizient = 0.5, Dämpfung = 0.3) wird der Grenzzustand erreicht. Der Reibungswinkel im Grenzzustand liegt bei etwa 32,5°. Darüber hinaus wurde ein linear-elastisches Modell ohne Bindung oder Zementierung zwischen den Partikeln angenommen. Das Modell selbst wird durch elastisches Verhalten und Reibungsverhalten gesteuert. Um die Berechnungszeit zu beschleunigen, wurde eine Hochskalierung der Partikelgröße um den Faktor 5 vorgenommen.

3.1.5 Modellierung der Remobilisierung

Nachdem der Schuttfächer modelliert und kalibriert wurde, kann die Reaktion des stabilen Modells auf potenzielle Gefahren analysiert werden. Dazu zählen Ereignisse wie Felssturz (Steinschlag), Wasserfluss (Niederschlag) und seismische Ereignisse. Im Schuttfächer werden bestimmte Partikel markiert, um deren maximale Positionsänderungen nachzuvollziehen (**Abbildung 13**).

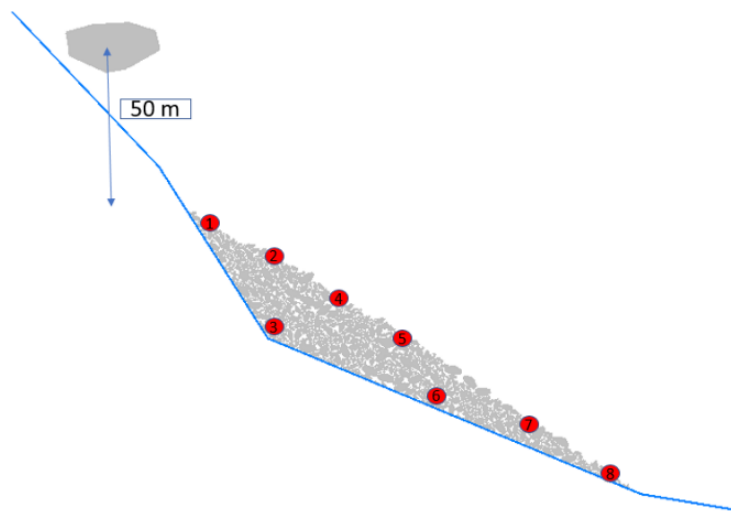


Abbildung 13. Markierte Partikel innerhalb des Schuttfächers.

3.1.5.1 Felsstürze

Für einen möglichen Felssturz auf den Schuttfächer wird der zu simulierende fallende Block mit CAD gezeichnet und in die PFC-Software eingebettet. Je nach Skalierungsfaktor wird der gleiche Skalierungsfaktor für die einzelnen Partikel des Schuttfächers verwendet. In diesem Fall wird ein Skalierungsfaktor von 5 gewählt, der anschließend weiter hochskaliert wird. Als nächstes wird der Ort bestimmt, von dem aus der Block zu fallen beginnt. Der fallende Block hat zu Beginn keine Geschwindigkeit und wird durch die Schwerkraft beschleunigt. Im Anschluss ermöglicht die Software eine Auswertung der maximalen Remobilisierung des Schuttfächers, die durch den Aufprall des Blocks verursacht wurde.

3.1.5.2 Extremniederschläge

Um den Wasserfluss zu simulieren, muss der Druck, der auf die einzelnen Partikel im Inneren des Schuttfächers wirkt, mit Hilfe des Darcy'schen Gesetzes berechnet werden. Dies geschieht in Abhängigkeit von der maximalen Niederschlagsmenge (88mm in Heiligenblut), die in dem untersuchten Gebiet gemessen wurde. Die Kraft, die das Wasser auf die Partikel ausübt, wird mit $123,3 \text{ N/m}^2$ ermittelt (k_f -Wert = 10^{-3} m/s). Da es in dieser Studie verschiedene Gruppen von Partikeln gibt, wird die Fläche jeder Gruppe zur Berechnung der äquivalenten Kraft verwendet. Schließlich werden die erhaltenen Kräfte auf das Modell in Abwärtsrichtung angewandt, um den Wasserfluss, sowie die verursachten Verschiebungen zu simulieren (**Abbildung 14**). Auch hier werden Skalierungen des maximalen Niederschlags vorgenommen, um Gerinnebildungen zu modellieren.

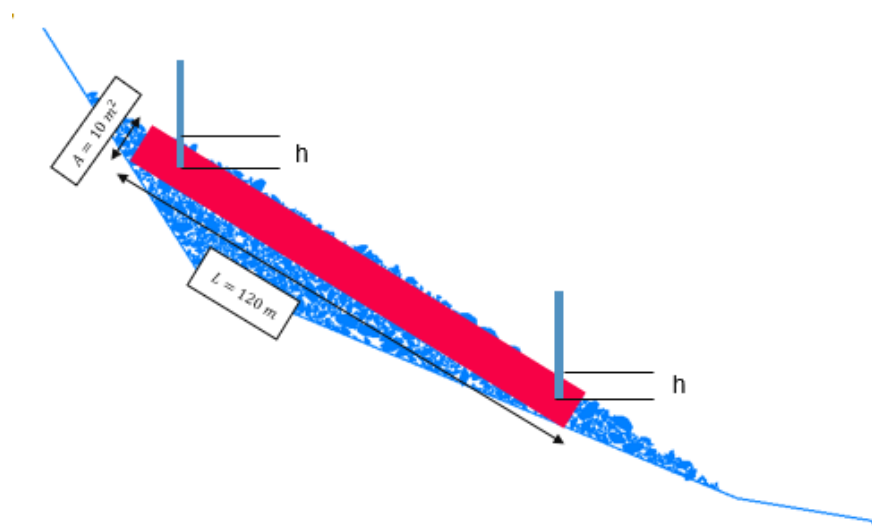


Abbildung 14. Visualisierung der Durchströmung des Schuttfächers.

3.1.5.3 Seismizität

Um seismische Aktivitäten zu modellieren, wird zunächst die maximale horizontale Referenzbodenbeschleunigung bestimmt (in diesem Gebiet zwischen 0,5 – 0,75 m/s²). Diese horizontale Beschleunigung wird dann auf das Modell angewendet. Anschließend kann die Stabilität des Schuttfächers für verschiedene Intensitäten bewertet werden.

3.2 Ergebnisse

Die Simulationen der äußeren Einflüsse zeigen, dass das Remobilisierungspotential von kleinräumigen Schuttfächern groß ist. Im Großmaßstab werden tiefgreifende große Remobilisierungen erst ab großen Magnituden der externen Einflüsse sichtbar. Alle detaillierten Ergebnisse können im Appendix nachgesehen werden.

3.2.1 Felssturz

Die Ergebnisse zeigen, dass kleinere Blöcke, die auf den Schuttfächer niedergehen, kein besonderes Remobilisierungspotential haben. So hat der Referenzblock nahezu keine Bewegungen im Schuttfächer verursacht. Erst mit zunehmender Größe (respektive der kontinuierlichen Skalierung des Referenzblocks) kommt es zu einer tiefgreifenden großen Remobilisierung. In **Abbildung 15** sind die maximalen Positionsveränderungen in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors zu finden.

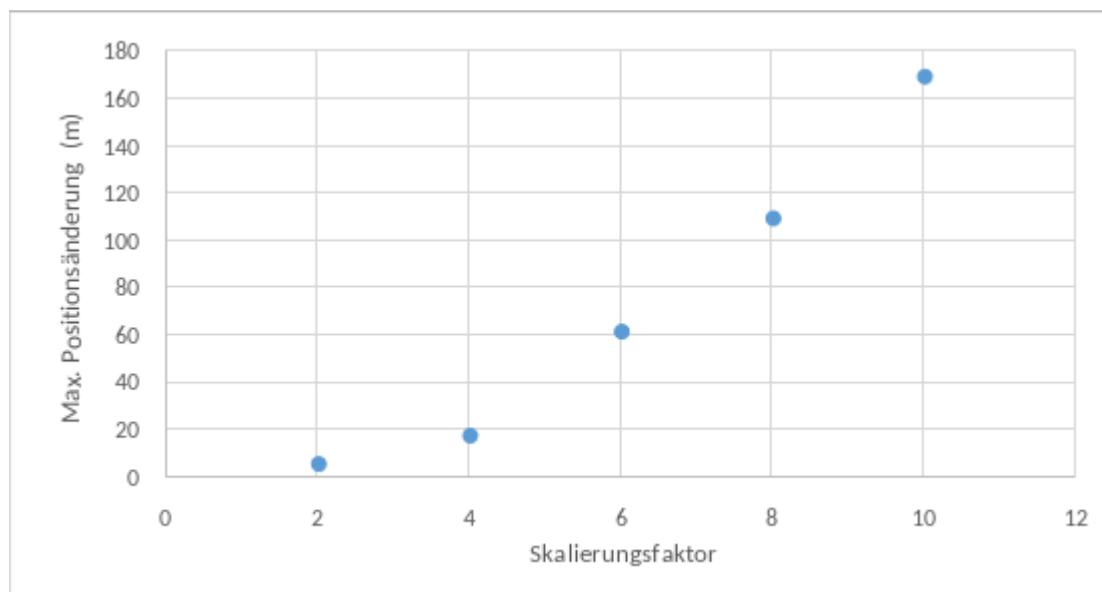


Abbildung 15. Maximale Positionsänderung in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors des Blocks.

3.2.2 Extremniederschläge

Im Untersuchungsgebiet liegt die maximale Niederschlagsmenge bei 88 mm. Auch hier konnte beobachtet werden, dass durch diese Niederschlagsmengen der Schuttfächer nicht großflächig remobilisiert werden kann. Jedoch konnte beobachtet werden, dass die Bewegungen, durch die auf jedes Partikel einwirkende Kraft tiefgreifender waren. Großflächige Remobilisierungen konnten allerdings erst ab einer Skalierung der Niederschläge mit dem Faktor 20 festgestellt werden (**Abbildung 16**).

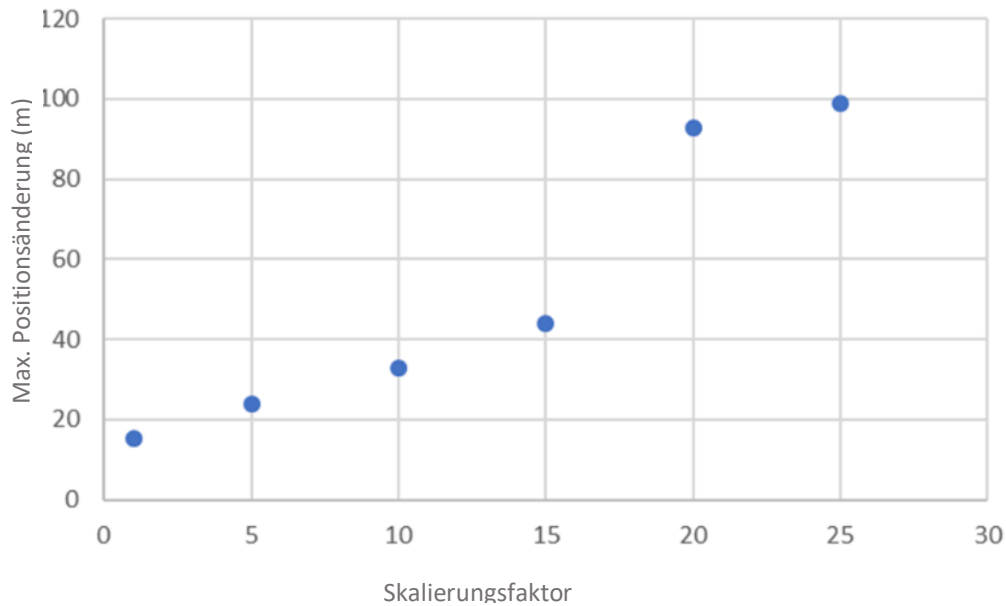


Abbildung 16. Maximale Positionsänderung in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors der maximal gemessenen Niederschläge.

3.2.3 Seismizität

Im Untersuchungsgebiet liegt die maximal zu erwartende Horizontalbeschleunigung bei 0,5 – 0,75 m/s^2 . Eine solche Beschleunigung führt zwar zu Verschiebungen im gesamten Schuttfächer, löst allerdings keine großflächigen Remobilisierungen aus. Erst ab einer horizontalen Beschleunigung von 2 m/s^2 kommt es zu einer großflächigen Remobilisierung des gesamten Schuttfächers (**Abbildung 17**).

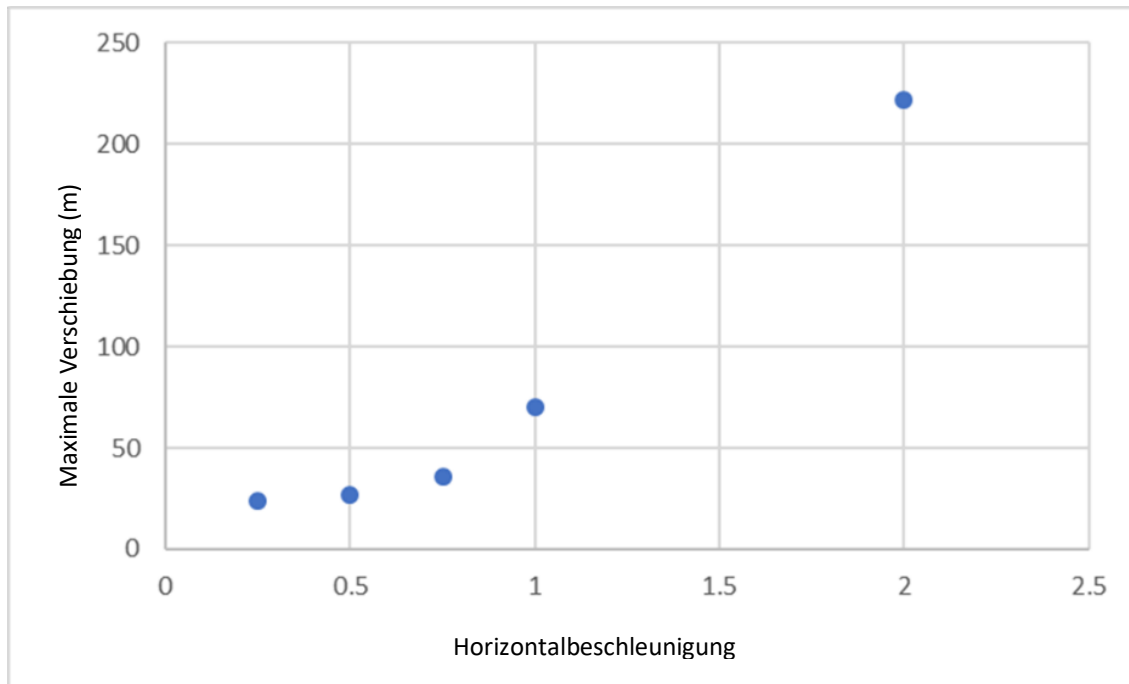


Abbildung 17. Maximale Positionsänderung in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors der horizontalen Referenzbodenbeschleunigung.

3.3 Interpretation und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Schuttfächers zeigen, dass die externen Einflüsse zwar einen Einfluss auf den Schuttfächer haben, jedoch nicht zu einer großen Remobilisierung führen. Es kann jedoch beobachtet werden, dass die Remobilisierung, je nach externem Einfluss, tiefer greifen kann. So sind bei einem Felssturz lediglich die oberen Bereiche des Schuttfächers betroffen, während Niederschläge und Seismizität zu Bewegungen im gesamten Schuttfächer führen können. Im Falle eines Felssturzes zeigt das Modell, dass der Block an der Oberfläche des Schuttfächers gleitet, bis er zum Stillstand kommt, oder die Sturzenergie des Blockes (je nach Winkel des Einschlags), durch die Dämpfung des Schuttfächers aufgenommen wird, und der Block somit zum Stillstand kommt. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine gute Übereinstimmung mit den gängigen Beobachtungen in der Natur. So zeigen Schuttfächer, obwohl sie einen instabilen Grenzgleichgewicht liegen in den seltensten Fällen bedeutende Remobilisierungsraten. Somit sind die Schuttfächer in der Lage die Gleichgewichtsänderungen kleinräumig auszugleichen.

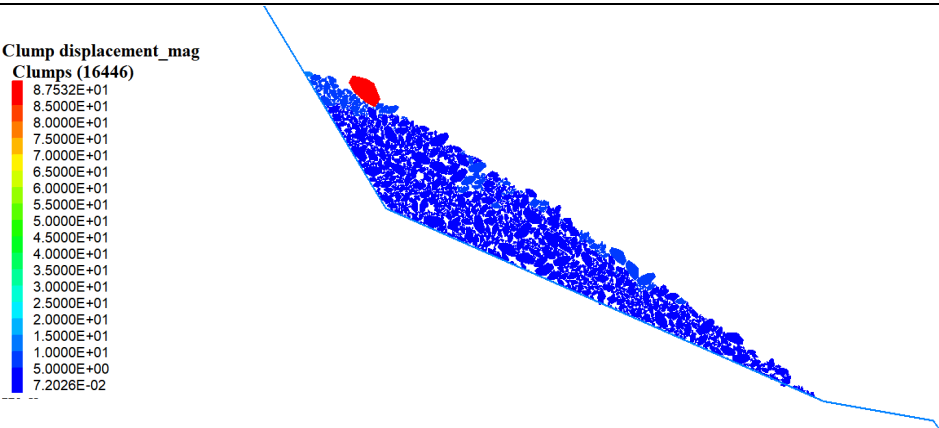
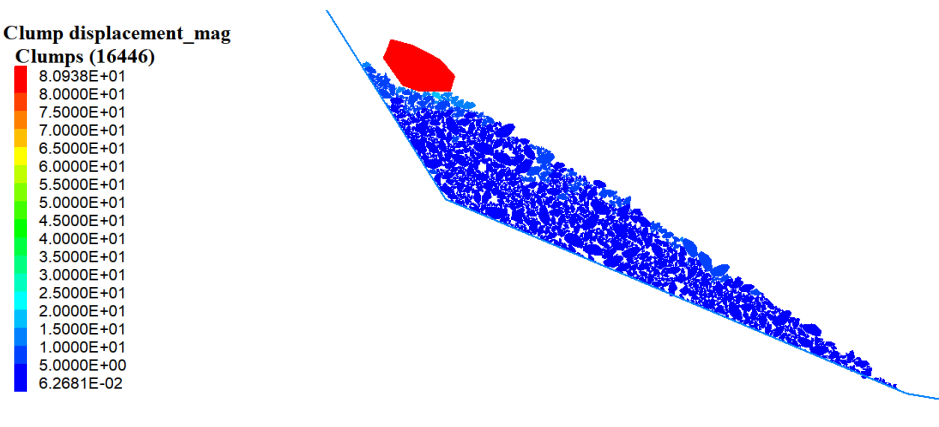
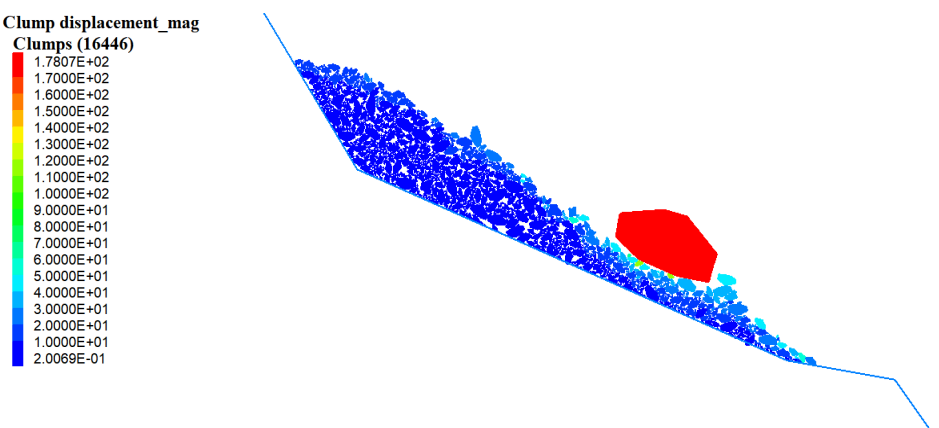
Es gilt jedoch anzumerken, dass die Modelle einige Vereinfachungen beinhalten. So wird beispielsweise angenommen, dass die oberflächennahe Korngrößenverteilung Schuttfächer mit jener des Untergrundes identisch ist. Durch stauende Schichten in den Schuttfächern kann vorkommen, dass besonders Porenwasserkräfte auftreten und der Reibungswinkel entsprechend herabsetzen wird. Daher müssen die numerischen Modelle mit der Erfahrung gepaart und interpretiert werden. Gegebenenfalls sind eine detailliertere numerische Simulation und weiterführende Experimente vonnöten.

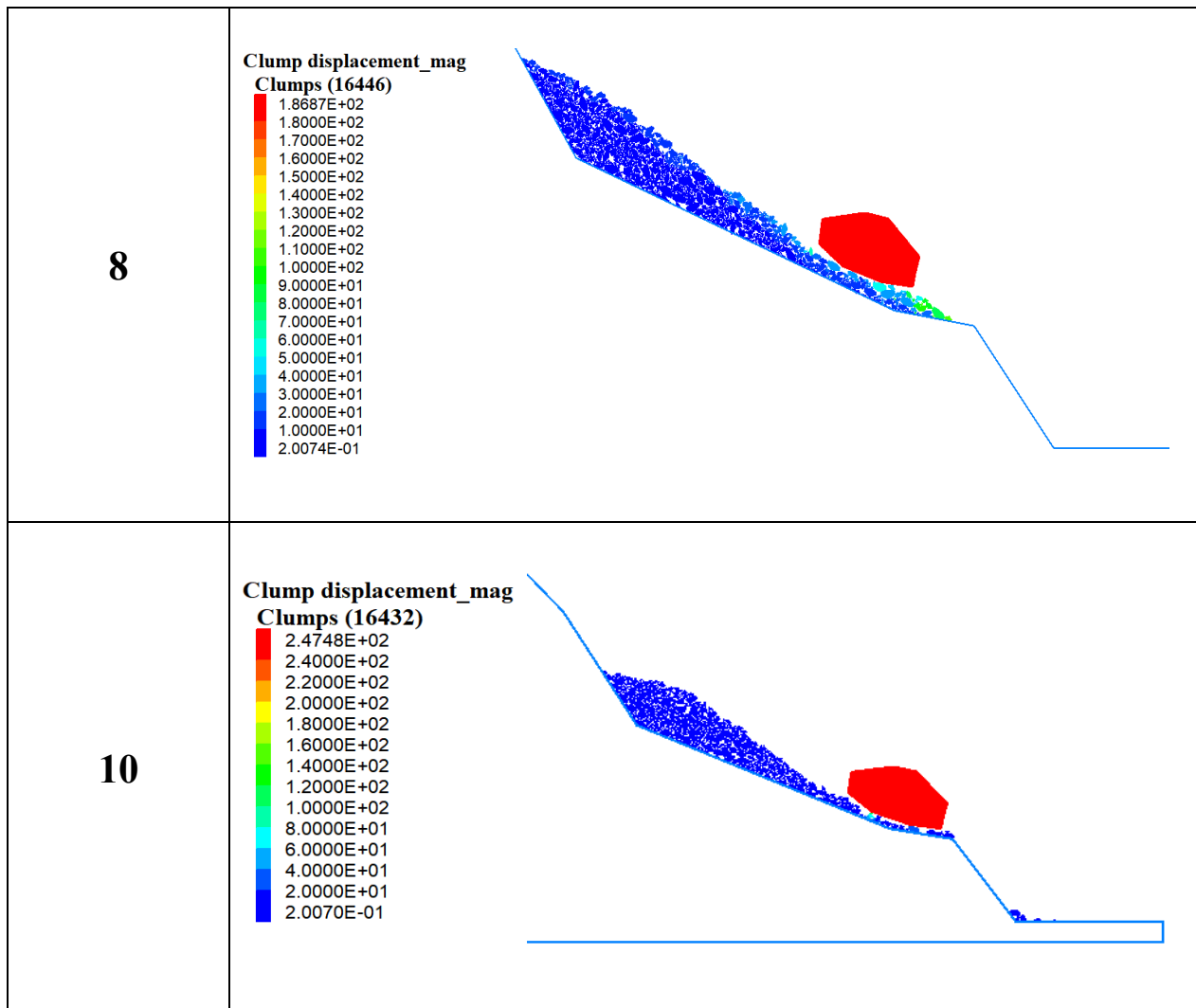
Danksagung

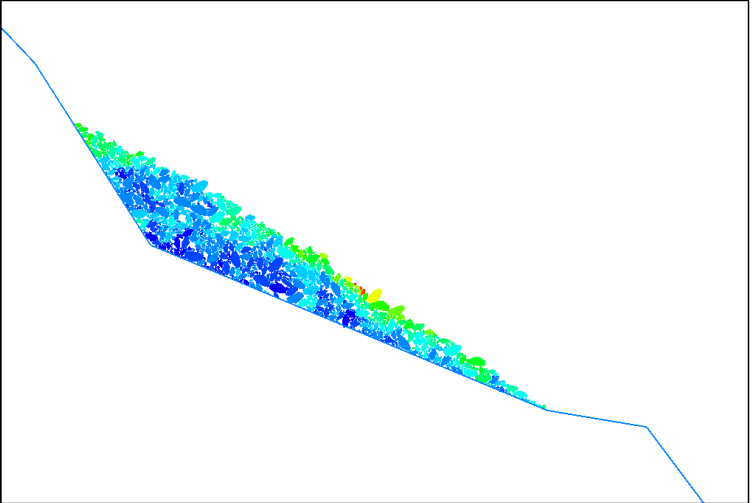
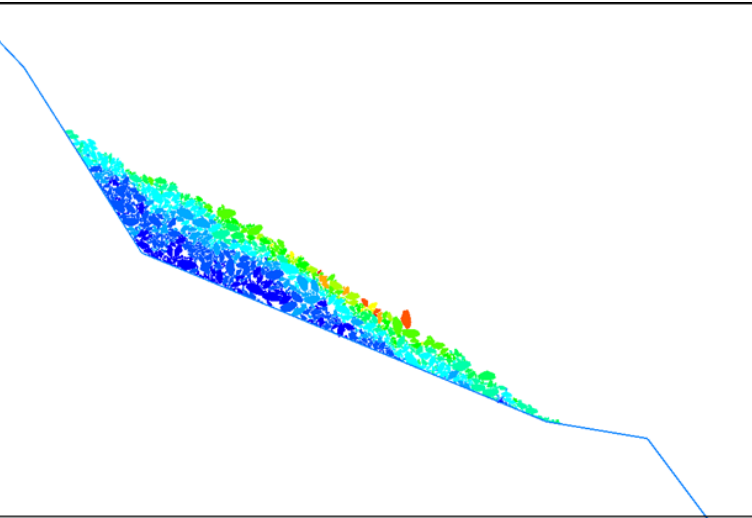
Ein großer Dank gebührt Andreas Gaich und Markus Pötsch von der 3GSM GmbH für die Unterstützung und der Beantwortung aller Fragen zur Software.

Abschließend bedanken wir uns beim gesamten Team des Projektes SedInOut. Der enthusiastische Gedanken-und Informationsaustausch war während der gesamten Projektlaufzeit für den Erfolg des Projektes von großer Bedeutung.

Appendix

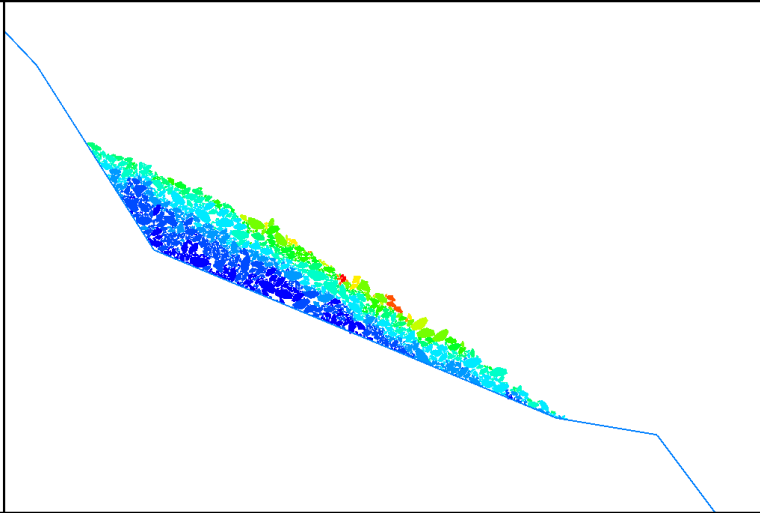
STEINSCHLAG	
Skalierungsfaktor	Magnitude der Verschiebung
2	Clump displacement_mag Clumps (16446)  8.7532E+01 8.5000E+01 8.0000E+01 7.5000E+01 7.0000E+01 6.5000E+01 6.0000E+01 5.5000E+01 5.0000E+01 4.5000E+01 4.0000E+01 3.5000E+01 3.0000E+01 2.5000E+01 2.0000E+01 1.5000E+01 1.0000E+01 5.0000E+00 7.2026E-02
4	Clump displacement_mag Clumps (16446)  8.0938E+01 8.0000E+01 7.5000E+01 7.0000E+01 6.5000E+01 6.0000E+01 5.5000E+01 5.0000E+01 4.5000E+01 4.0000E+01 3.5000E+01 3.0000E+01 2.5000E+01 2.0000E+01 1.5000E+01 1.0000E+01 5.0000E+00 6.2681E-02
6	Clump displacement_mag Clumps (16446)  1.7807E+02 1.7000E+02 1.6000E+02 1.5000E+02 1.4000E+02 1.3000E+02 1.2000E+02 1.1000E+02 1.0000E+02 9.0000E+01 8.0000E+01 7.0000E+01 6.0000E+01 5.0000E+01 4.0000E+01 3.0000E+01 2.0000E+01 1.0000E+01 2.0069E-01



NIEDERSCHLÄGE	
Skalierungsfaktor	Magnitude der Verschiebung
0	PFC2D 5.00 ©2019 Itasca Consulting Group, Inc. Clump displacement_mag Clumps (16379) 1.5215E+01 1.5000E+01 1.4000E+01 1.3000E+01 1.2000E+01 1.1000E+01 1.0000E+01 9.0000E+00 8.0000E+00 7.0000E+00 6.0000E+00 5.0000E+00 4.0000E+00 3.0000E+00 2.0000E+00 1.0000E+00 1.4719E-01 Wall Facets (10) facets 
5	PFC2D 5.00 ©2019 Itasca Consulting Group, Inc. Clump displacement_mag Clumps (16379) 2.4897E+01 2.4000E+01 2.2000E+01 2.0000E+01 1.8000E+01 1.6000E+01 1.4000E+01 1.2000E+01 1.0000E+01 8.0000E+00 6.0000E+00 4.0000E+00 2.0000E+00 9.9676E-02 Wall Facets (10) facets 

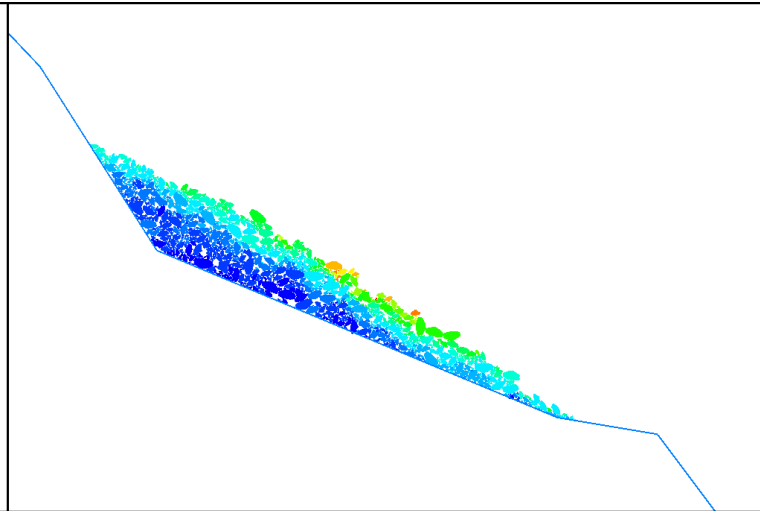
10

PFC2D 5.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.
Clump displacement_mag
Clumps (16379)
3.3675E+01
3.2500E+01
3.0000E+01
2.7500E+01
2.5000E+01
2.2500E+01
2.0000E+01
1.7500E+01
1.5000E+01
1.2500E+01
1.0000E+01
7.5000E+00
5.0000E+00
2.5000E+00
2.0073E-01
Wall
Facets (10)
facets



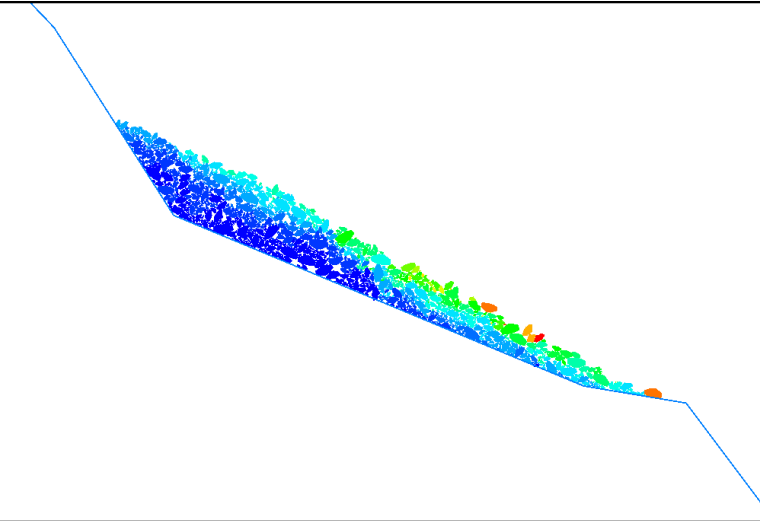
15

PFC2D 5.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.
Clump displacement_mag
Clumps (16379)
4.4093E+01
4.2500E+01
4.0000E+01
3.7500E+01
3.5000E+01
3.2500E+01
3.0000E+01
2.7500E+01
2.5000E+01
2.2500E+01
2.0000E+01
1.7500E+01
1.5000E+01
1.2500E+01
1.0000E+01
7.5000E+00
5.0000E+00
2.5000E+00
1.3074E-01
Wall
Facets (10)

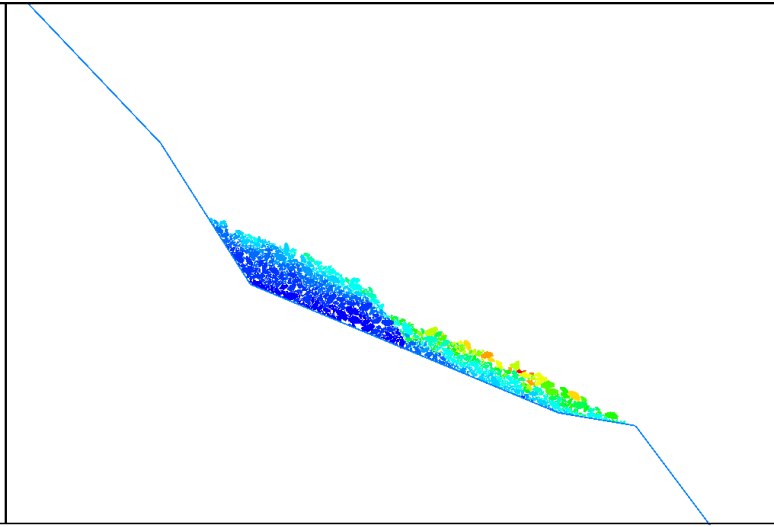
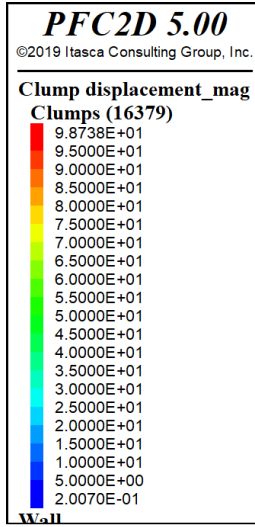


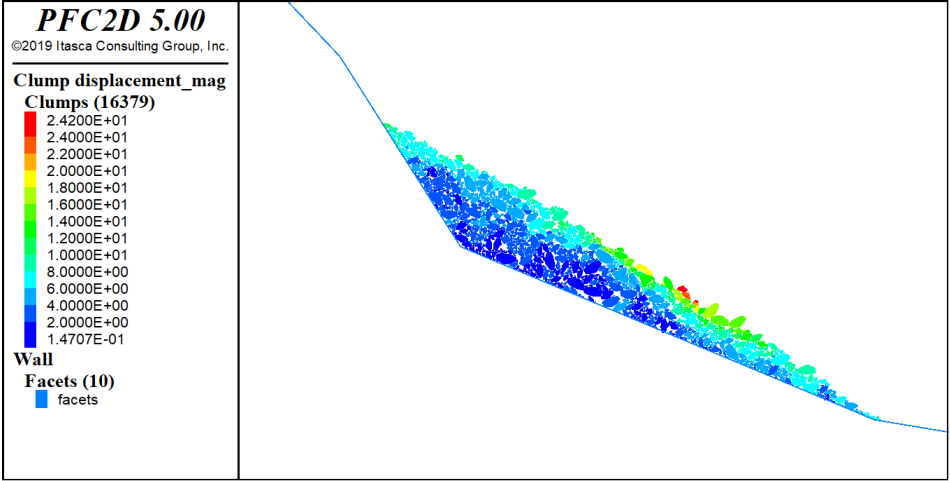
20

PFC2D 5.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.
Clump displacement_mag
Clumps (16366)
9.2819E+01
9.0000E+01
8.5000E+01
8.0000E+01
7.5000E+01
7.0000E+01
6.5000E+01
6.0000E+01
5.5000E+01
5.0000E+01
4.5000E+01
4.0000E+01
3.5000E+01
3.0000E+01
2.5000E+01
2.0000E+01
1.5000E+01
1.0000E+01
5.0000E+00
2.0075E-01
Wall
Facets (10)



25



SEISMIZITÄT	
Horizontale Beschleunigung	Magnitude der Verschiebung
0.25 m/s^2	
0.5 m/s^2	