

KOPPLUNG VON GEOINFORMATIONSSYSTEMEN UND SIMULATIONSSYSTEMEN ZUR ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG

Eva Ortlieb¹, Wolfgang Reinhardt¹ und Franz-Xaver Trauner²

¹Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (AGIS), Universität der Bundeswehr München,
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
{eva.ortlieb, wolfgang.reinhardt}@unibw.de

²Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München, Werner-
Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
franz-xaver.trauner@unibw.de

Zusammenfassung

Obwohl in den letzten Jahren zahlreiche Forschungen im Bereich Frühwarnsysteme stattgefunden haben, sind die Gefährdungserkennung und die zeitgerechte Vorhersage von Ereignissen immer noch ein Schwachpunkt der Frühwarnkette. In einem aktuellen Forschungsprojekt wird ein neuer Ansatz zur Behebung dieser Schwachpunkte im Bereich Frühwarnsysteme für Hangrutschungen verfolgt: komplexe Simulationen von Hangrutschungen werden mit Geoinformationssystemen (GIS) gekoppelt. Dies ermöglicht einerseits die detaillierte Untersuchung von instabilen Hängen mit Hilfe der Simulation und andererseits die nutzerfreundliche Aufbereitung der komplexen Simulationsergebnisse im GIS zur Entscheidungsunterstützung. In diesem Beitrag soll eine Methodik zur Analyse und Visualisierung der komplexen Simulationsergebnisse vorgestellt werden, mit der sie einem Entscheidungsträger zur Entscheidungsunterstützung präsentiert werden können.

Abstract

Although numerous researches in the field of early warning systems were made in the last years, the understanding of the hazard and the forecasting of impending events are still particularly weak points of the early warning chain. In an ongoing research project a new approach to improve these critical points in the field of early warning systems of landslides is pursued: complex simulations of landslides are coupled with geoinformation systems. This allows on the one hand for the detailed investigation of instable slopes with the help of the simulation and on the other hand the user-friendly preparation of the complex simulation results in the GIS for decision support. In this paper a method for analysis and visualization of complex simulation results for decision support is presented.

Einführung

Der Sinn eines Frühwarnsystems für geologische Ereignisse besteht in der Vorhersage von Ereignissen zum Schutz von Leben und Gütern. Für eine zuverlässige Frühwarnung müssen die vorliegenden Daten so aufbereitet werden, dass sie als zuverlässige Grundlage für das frühzeitige Erkennen von Gefahren und für die zeitgerechte Vorhersage von Ereignissen dienen können (NDMA, 2008). Obwohl in den letzten Jahren zahlreiche Arbeiten zur Erforschung von Naturgefahren durchgeführt wurden (Dikau und Glade, 2002; Blöchl und Braun, 2005; Alexander, 2006; Werner-Allen et al., 2005), sind diese Punkte noch Schwachpunkte der Frühwarnkette.

Das Verbundprojekt „Entwicklung geeigneter Informationssysteme für Frühwarnsysteme“ befasst sich mit der Entwicklung von geeigneten Komponenten zur Behebung dieser Schwachpunkte im Bereich Frühwarnsysteme für Hangrutschungen. Innerhalb des Projekts kommen neuartige Kombinationen aus GIS, Finite-Elemente-Analyse, Spatial Data Mining, textlichen Analysen und Geodatenbanken zum Einsatz (Breunig et al., 2007; Breunig et al., 2008). Ein Teilprojekt befasst sich mit der Kopplung von komplexen Finite Elemente (FE) Simulationen von Hangrutschungen und Geoinformationssystemen (Ortlieb et al., 2008; Trauner et al., 2008). Durch die Kopplung der beiden Systeme soll ein

Entscheidungsunterstützungssystem aufgebaut werden, so dass ein Anwender bei seiner Entscheidung ob eine Frühwarnung ausgelöst werden muss oder nicht, unterstützt werden kann.

Finite Elemente Simulationen werden derzeit hauptsächlich von Experten oder Wissenschaftlern genutzt. Im Katastrophenschutz bzw. im Katastrophenmanagement findet sie bisher kaum eine Anwendung, obwohl sie dort als hilfreiches Tool zur Untersuchung von Szenarien oder zum Erstellen von Prognosen eingesetzt werden könnten. Ein Grund hierfür ist in den komplexen Eingabeparametern und der fehlenden Unterstützung bei deren Konfiguration zu finden. Des Weiteren sind die Ergebnisparameter einer Simulation sehr komplex und schwer verständlich. Die Interpretation der Berechnungsergebnisse wird jedoch nicht vom Simulationssystem unterstützt. Um FE-Simulationen von Hangrutschungen für einen größeren Kreis verfügbar zu machen, muss ihre Handhabung nutzerfreundlicher und intuitiver werden. Dazu bietet sich die Kopplung mit einem GIS an, welches im Vorfeld der Simulation Unterstützung bei der Aufbereitung der nötigen Daten bieten kann. Weiter bietet ein GIS eine gute Umgebung zur Aufbereitung und Analyse der komplexen Ergebnisse sowie zur Unterstützung einer Entscheidung.

In diesem Beitrag soll zu Beginn die Architektur des gekoppelten Systems vorgestellt werden. Im Anschluss daran werden zwei Anwendungsmodi des gekoppelten Systems eingeführt. Anschließend sollen die Ergebnisse der Simulation betrachtet und eine Methodik zu deren Aufbereitung und Analyse im GIS vorgestellt werden. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Architektur und Datenfluss des gekoppelten Systems

In Abbildung 1 ist die Architektur des gekoppelten Systems zu sehen. Der Ablauf beginnt mit der Auswahl und Aufbereitung der Eingabeparameter für die FE-Simulation im GIS. Es werden umfangreiche und detaillierte Eingabeparameter benötigt:

- ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell,
- die Grenzflächen zwischen verschiedenen Bodenschichten (Geologie),
- das Material der Bodenschichten,
- die Randbedingungen (Fixierung der Modellränder) und
- die einwirkenden Belastungen.

Als elementarer Eingabeparameter für die FE-Simulation wird ein FE-Netz benötigt, welches aus den Eingangsparametern generiert wird. Ein Beispiel eines einfachen FE-Netzes für eine 2D-Simulation ist in Abbildung 2 zu sehen. Das Netz besteht aus einer Menge von Knoten, welche die finiten Elemente festlegen. Die finiten Elemente wiederum repräsentieren die Hanggeometrie.

Ein wichtiger Eingabeparameter ist die Geologie des Hanges. Hierzu gehören der Verlauf sowie das Material der Bodenschichten. Zusätzlich muss der Bereich festgelegt werden, der analysiert werden soll. Außerdem müssen Einwirkungen, die auf das System wirken (z.B. Gravitationskräfte, Bauwerks- und Verkehrslasten, geometrische Änderungen, etc.) in der Eingabedatei definiert werden. Mit Hilfe dieser Einwirkungen können Ereignisse (z.B. Starkregen) abgebildet werden, deren Einfluss untersucht werden soll. Je größer z.B. Belastungen sind, umso stärkere Hangverformungen sind auch meist zu erwarten. Die Eingabeparameter werden in eine Eingabedatei geschrieben und vom GIS gesteuert an das Simulationssystem transferiert.

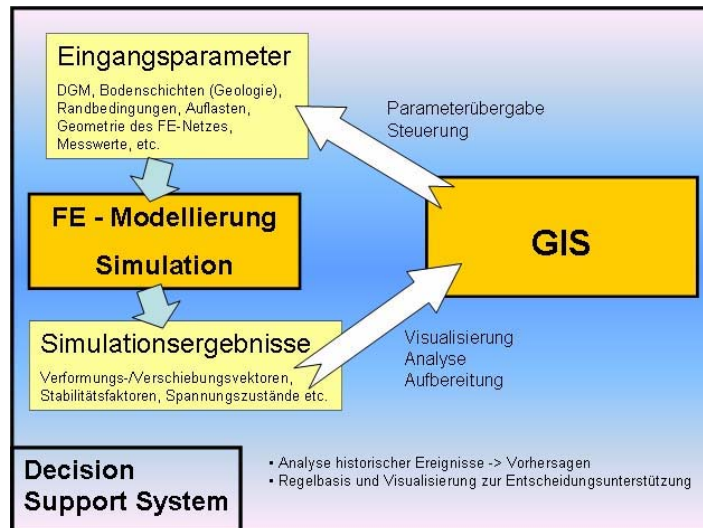


Abbildung 1: Architektur des gekoppelten Systems.

Im Simulationssystem werden die Daten aus der Eingabedatei ausgelesen. Anschließend wird ein geotechnisches Modell des Untersuchungsbereichs modelliert. In diesem Schritt werden die Bodenschichten durch das FE-Netz abgebildet sowie die Eigenschaften verschiedener Materialien den Bodenschichten zugeordnet. Nach der Modellierung des Hanges werden die in der Eingabedatei definierten Belastungen aufgebracht und deren Einfluss simuliert.

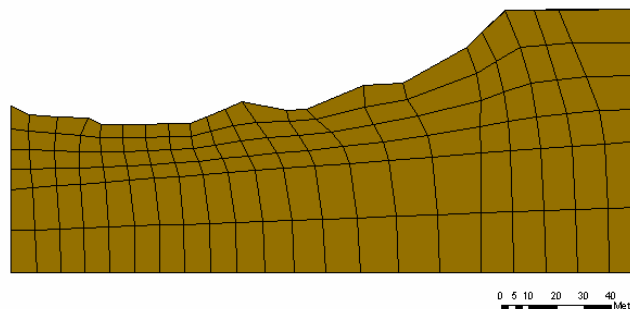


Abbildung 2: Finites Elementenetz einer 2D-Simulation.

Die Ergebnisse der Simulation beziehen sich auf die FE-Netzknoten. Simulationsergebnisse können z.B. die Verschiebungsraten der Knoten sein, welche diese aufgrund der definierten Einwirkungen erfahren haben. Die Größe dieser Verschiebungen resultiert aus der Größe der aufgetragenen Belastungen. Die Simulationsergebnisse werden zur Aufbereitung, Analyse und Visualisierung an das GIS transferiert. Darüber hinaus können die Simulationsergebnisse im GIS mit Regeln und Grenzwerten verknüpft werden, um die Entscheidung, ob eine Frühwarnung ausgelöst werden soll oder nicht, zu unterstützen.

Anwendungsmodi des gekoppelten Systems

Finite Elemente Simulationen können sehr rechenintensiv und zeitaufwändig sein. Wenn schnell eine Entscheidung über eine Frühwarnung getroffen werden soll ist deshalb häufig nicht genügend Zeit für eine umfangreiche Simulation. Deshalb werden zwei Anwendungsmodi des gekoppelten Systems unterschieden (Ortlieb et al., 2009):

- Das Lernsystem, zur Untersuchung von Hängen und deren Versagensmechanismus und
- das Decision Support System, zur Verhinderung oder zur Reaktion / Frühwarnung, wenn ein hangrutschungsauslösendes Ereignis erwartet wird.

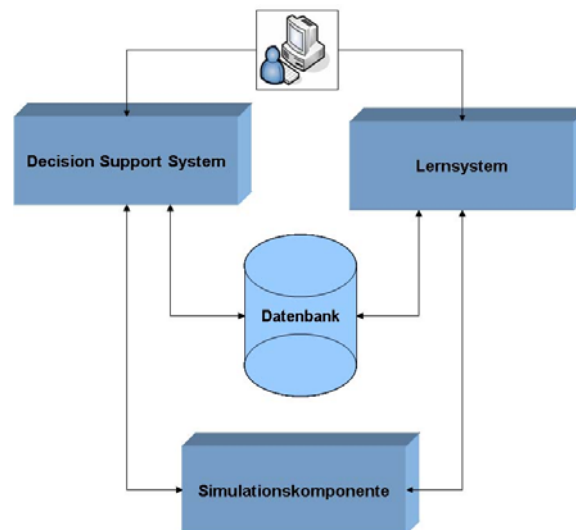


Abbildung 3: Architektur des Lern- und des Decision Support Systems.

Das Lernsystem erlaubt die Evaluierung der Auswirkung verschiedener Szenarien und ermöglicht so ein besseres Verständnis und ein zeitgerechtes Vorhersagen von Hangrutschungen. Innerhalb des Lernsystems können dazu verschiedene Simulationen analysiert und verglichen werden. Dies können z.B. Simulationen sein, die unter verschiedenen Voraussetzungen oder für verschiedene Zeitpunkte berechnet wurden. Weiter ist der Vergleich von historischen Ereignissen mit simulierten Ereignissen möglich. Dadurch können kritische Ereignisse (z.B. ein Starkregenereignis) bestimmt werden. Dies wiederum erlaubt eine frühere Warnung, wenn ein solches Ereignis eintritt oder erwartet wird. Eine weitere Funktionalität des Lernsystems ist der Vergleich von Simulationen mit aktuellen Messwerten. Dies ermöglicht die Verbesserung, Kalibrierung und Verfeinerung von Simulationen. Die im Lernsystem erhaltenen Ergebnisse werden in einer Datenbank abgespeichert, so dass sie für weitere Analysen bzw. zur Verwendung im Decision Support System zur Verfügung stehen (Abbildung 3).

Das Decision Support System kommt zum Einsatz, wenn eine akute Gefahr vorliegt und eine schnelle Entscheidung getroffen werden muss, ob ein Hang als rutschgefährdet eingestuft werden muss oder nicht. Dies kann z.B. ein Starkregenereignis sein, welches den Hang durchfeuchten und damit destabilisieren könnte oder Wasserläufe anschwellen lässt, welche die Ufer (Hangfußbereich) erodieren könnte. In diesem Fall ist keine Zeit für komplexe und zeitaufwändige Simulationen. Sind bereits Simulationen für das betroffene Gebiet und für das eingetretene Szenario in der Datenbank vorhanden, so können diese als Entscheidungsgrundlage verwendet werden. Ist dies nicht der Fall, so müssen zeitsparende vereinfachte Simulationen durchgeführt werden. Ob und wie diese vereinfachten Simulationen ohne zu großen Genauigkeitsverlust durchgeführt werden können, wird derzeit noch untersucht. Erste Tests mit 2D-Simulationen verliefen jedoch viel versprechend.

Ergebnisse der Simulation

Das Ergebnis der Simulation sind verschiedene Parameter (Verformungen, Spannungen, etc.), welche sich auf die Knoten des FE-Netzes beziehen. In Abbildung 4 ist das Ergebnis einer 3D-Simulation zu sehen. In diesem Beispiel wurden die Verschiebungsraten der Netzknoten als Verschiebungsvektoren visualisiert. Jedoch wurde das Netz für die Simulation so hochaufgelöst gewählt, dass von den visualisierten Verschiebungsvektoren kaum etwas zu erkennen ist. Damit die entscheidenden Parameter, Verschiebungsrichtung und -länge der Verschiebungsvektoren, abgelesen werden können, muss die Darstellung stark vergrößert werden. Der Gesamtüberblick über den Hangabschnitt geht dadurch jedoch verloren.



Abbildung 4: Visualisierte 3D-Simulationsergebnisse.

In Abbildung 5 ist das Ergebnis einer 2D-Simulation zu sehen. Auch hier wurden die Verschiebungsraten der Elementnetzknoten als Verschiebungsvektoren visualisiert. Im Gegensatz zu den 3D-Simulationsergebnissen in Abbildung 4, lassen sich hier jedoch aufgrund des viel größeren Netzes die einzelnen Verschiebungsvektoren erkennen und voneinander unterscheiden. Von der Abbildung können direkt Verschiebungsrichtung und -länge abgelesen werden. Allerdings können anhand dieser Darstellung noch keine Aussagen darüber getroffen werden, für welche Bereiche die Verschiebungsvektoren gelten und ob der Hang, oder Bereiche des Hanges, als rutschgefährdet eingestuft werden müssen.

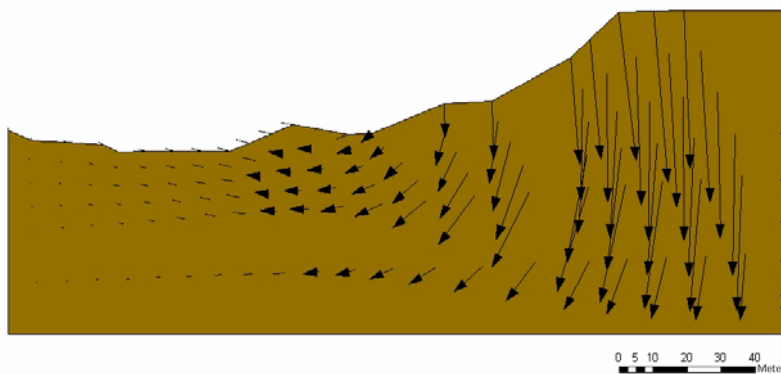


Abbildung 5: Visualisierte 2D-Simulationsergebnisse.

Das Problem ist also, dass die Simulationsergebnisse zu komplex und unübersichtlich sind, um in ihrer Originalform zur Entscheidungsunterstützung präsentiert werden zu können. Deshalb muss eine Methodik herangezogen werden, welche es erlaubt, die Simulationsergebnisse in geeigneter Weise aufzubereiten und zu visualisieren. Im Fall von Verschiebungsvektoren sollen die unübersichtlichen Verschiebungsvektoren ausgedünnt und zusammengefasst werden.

Aufbereitung der komplexen Simulationsergebnisse zur Entscheidungsunterstützung

Im Folgenden soll eine Methode zur Zusammenfassung von Verschiebungsvektoren vorgestellt werden. Die Methodik soll am Beispiel der aus den 2D-Simulationsergebnissen erzeugten Verschiebungsvektoren in Abbildung 5 erläutert werden. In der Abbildung handelt es sich um stark überhöhte Verschiebungsvektoren, da die Größe der Originalverschiebungsvektoren zu gering für die Visualisierung wäre.

Die Länge des Verschiebungsvektors kann Auskunft darüber geben, ob der Hang als rutschgefährdet eingestuft werden muss oder nicht. Sie resultiert direkt aus den während der Simulation auf den Rutschkörper aufgetragenen Belastungen. Je stärker diese aufgetragenen Belastungen sind, umso größer sind meist auch die Verschiebungen einzelner FE-Netzknoten und damit die Längen der Verschiebungsvektoren, welche die Elementknoten nach der Simulation aufweisen. Deshalb wird im ersten Schritt die Länge der Verschiebungsvektoren berechnet. Anschließend erfolgt anhand der berechneten Länge eine Einteilung der Verschiebungsvektoren in Klassen. Die Unterteilung der Klassen kann dabei erfolgen in:

- Klassen mit keinen oder sehr geringen Verschiebungen (grüne Vektoren);
- Klassen mit geringen Verschiebungen (gelbe Vektoren);
- Klassen mit mittleren Verschiebungen (orange Vektoren) und
- Klassen mit großen Verschiebungen (rote Vektoren).

Das Ergebnis der Einteilung ist in Abbildung 6 zu sehen.

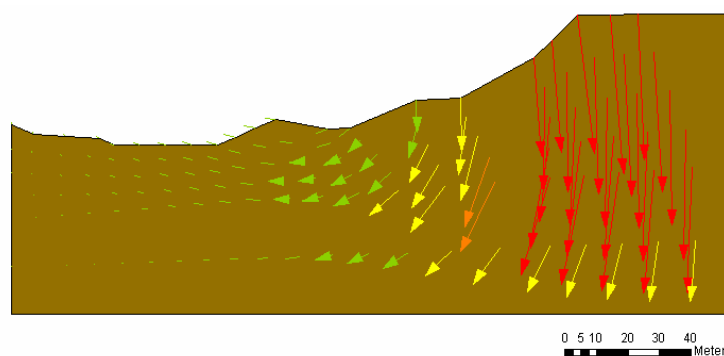


Abbildung 6: In Klassen eingeteilte Verschiebungsvektoren.

Zur Bestimmung, welche Verschiebungsvektoren zusammengefasst werden können, muss neben der Länge auch die Verschiebungsrichtung der Vektoren bestimmt werden. Sie wird benötigt, da nur Verschiebungsvektoren zusammengefasst werden können, welche ungefähr dieselbe Verschiebungsrichtung ausweisen. Auch für die Richtung erfolgt eine Einteilung der Verschiebungsvektoren in Klassen.

Im nächsten Schritt werden die Verschiebungsvektoren in Gruppen eingeteilt. Diese Cluster werden aus Ansammlungen von Verschiebungsvektoren gebildet, welche die gleichen Eigenschaften besitzen. Um zu einem Cluster zusammengefasst zu werden, müssen die Verschiebungsvektoren drei Kriterien erfüllen:

- Die Verschiebungsvektoren müssen der gleichen Richtungsklasse angehören,
- die Verschiebungsvektoren müssen der gleichen Längensklasse angehören und
- die Verschiebungsvektoren müssen räumlich benachbart sein.

Die Verschiebungsvektoren in den Clustern lassen sich zu einem Verschiebungsvektor zusammenfassen, der über drei Größen definiert wird:

- Einem Anfangspunkt, der aus Mittelung aller Anfangspunkte der Verschiebungsvektoren im Cluster resultiert,
- einer Richtung, die aus Mittelung aller Richtungen der Verschiebungsvektoren im Cluster resultiert und
- einer Länge, die der Länge des längsten Verschiebungsvektors im Cluster entspricht.

Statt einer Länge, die aus Mittelung aller Längen der Verschiebungsvektoren im Cluster resultiert, wird hier die Länge des längsten Verschiebungsvektors im Cluster gewählt, da es riskant wäre, einen Verschiebungsvektor zu verkürzen.

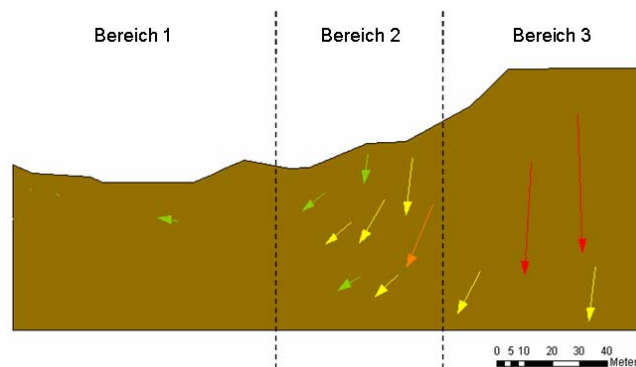


Abbildung 7: Zusammengefasste Verschiebungsvektoren.

In Abbildung 7 ist zu sehen, dass die angewandte Methodik in einigen Bereichen (1 und 3) des Rutschkörpers sehr gute Ergebnisse liefert und so eine übersichtliche vereinfachte Darstellung der Verschiebungsvektoren ermöglicht. In anderen Bereichen jedoch (2), finden sich noch Ansammlungen von Verschiebungsvektoren, die sehr unübersichtlich sind. Diese Verschiebungsvektoren können weiter zusammengefasst werden, indem räumlich benachbarte Vektoren bei benachbarten Richtungs- und Längenklassen zu Clustern kombiniert werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 zu sehen.

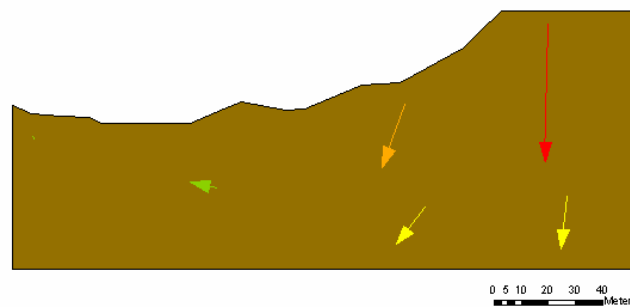


Abbildung 8: Erneut zusammengefasste Verschiebungsvektoren.

Mit Hilfe der vorgestellten Methodik sind die unübersichtlichen Verschiebungsvektoren auf eine überschaubare Anzahl reduziert worden. Anhand der so erhaltenen Darstellung (Abbildung 8) lässt sich jedoch noch keine Aussage darüber treffen, für welchen Bereich des Hanges ein Verschiebungsvektor gilt.

Bestimmung von Gültigkeitsbereichen

Zur Bestimmung von Bereichen, in denen die ausgedünnten Verschiebungsvektoren gelten, wird das FE-Netz herangezogen. Im ersten Schritt werden für alle Cluster die Knoten selektiert, deren Verschiebungsvektoren in diesem Cluster zusammengefasst wurden (siehe Abbildung 9).

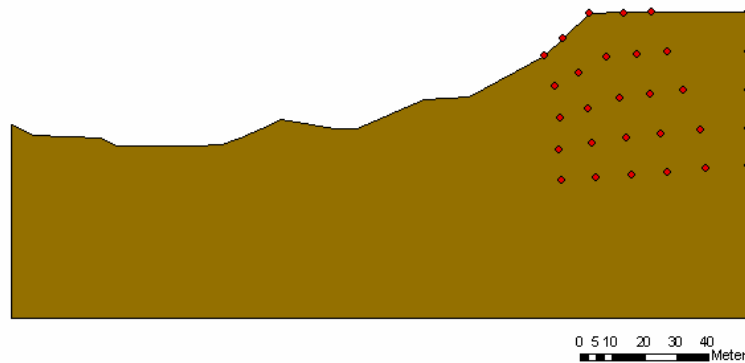


Abbildung 9: Finite Elementnetzknotten in einem Cluster.

Danach werden diejenigen Netzknotten selektiert, welche den äußeren Rand des Clusters bilden (siehe Abbildung 10, blau selektierte Knotten). Eine Möglichkeit der Bereichsbildung wäre nun, den Rutschkörper entlang der selektierten Elemente zu unterteilen. Die Bereiche würden dann jedoch nicht direkt aneinander anschließen, sondern es würden Lücken auftreten. Um dies zu verhindern, wird der Bereich mit einer halben FE-Netzkantenlänge Abstand um die FE-Netzknotten gebildet. Hierzu werden die von den äußeren Knotten abgehenden Elementkanten, welche außerhalb des Clusters liegen, selektiert (siehe Abbildung 10, blau selektierte Kanten).

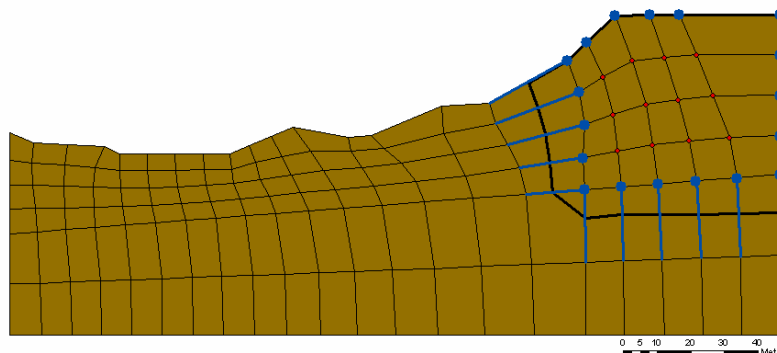


Abbildung 10: Erstellter Verschiebungsbereich.

In der Mitte der selektieren Kanten werden dann Stützpunkte berechnet, durch deren Verbindung der Bereich, in welchem die ausgedünnten Verschiebungsvektoren gelten, erhalten wird (siehe Abbildung 10, schwarzes Polygon).

So kann der gesamte Rutschkörper in Bereiche, denen die entsprechenden Verschiebungsvektoren zugeordnet sind, unterteilt werden (siehe Abbildung 11). Damit ist nun leicht erkennbar, in welchen Bereichen sich der Rutschkörper wie stark und in welche Richtung verschieben wird, wen das simulierte Ereignis eintritt. Das erhaltene Ergebnis kann so als Grundlage für das frühzeitige Erkennen von Gefahren und für die zeitgerechte Vorhersage einer Hangrutschung dienen.

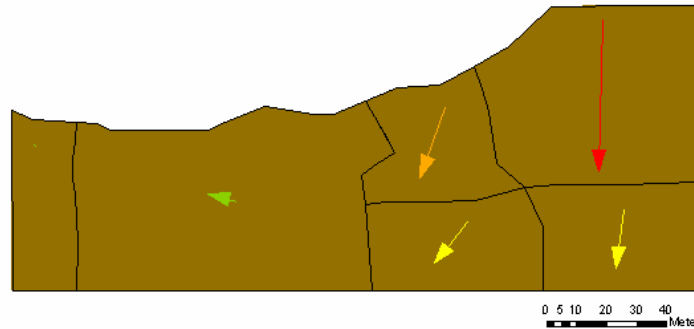


Abbildung 11: Bereiche mit zugeordneten Verschiebungsvektoren.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde eine geometrische Methode zur Zusammenfassung von komplexen Simulationsergebnissen und zur Bestimmung von Gültigkeitsbereichen am Hang zur Entscheidungsunterstützung vorgestellt. Im Folgenden muss nun untersucht werden, wie diese Ergebnisse mit Regeln verknüpft werden können, um einen Entscheidungsträger optimal bei einer Entscheidung unterstützen zu können, ob eine Frühwarnung ausgelöst werden muss oder nicht.

Im Weiteren muss die Übertragung der entwickelten Methode auf 3D-Simulationsergebnisse untersucht werden. Hier sind unter anderem Profilschnitte durch den 3D-Rutschkörper denkbar, damit auch das Innere für den Entscheidungsträger sichtbar gemacht werden kann.

Weitere Untersuchungen müssen im Bereich der Bestimmung und Visualisierung von Unsicherheiten vorgenommen werden. Unsicherheiten treten sowohl in den Ausgangsdaten der Simulation als auch während der Simulation und in den Aufbereitungsalgorithmen auf. Für diese Unsicherheiten müssen geeignete Methoden gefunden werden, um ihren Einfluss zu beschreiben und dies bei der Aufbereitung der Simulationsergebnisse zu berücksichtigen und dem Nutzer kenntlich zu machen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (www.lfu.bayern.de) für die Bereitstellung von Messdaten sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Forschungsvorhabens (Förderkennzeichen: 03G0645A) innerhalb des FuE-Programms GEOTECHNOLOGIEN (Publikationsnummer: GEOTECH – 1198).

Referenzen

- Alexander, D. (2006): Globalization of Disaster: Trends, Problems and Dilemmas. *Journal of International Affairs* 59 (2), 1-22.
- Blöchl, A. und Braun, B. (2005): Economic assessment of landslide risk in the Swabian Alb, Germany – research framework and first results of homeowners' and expert's surveys. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 389-396.
- Breunig, M., Reinhardt, W., Ortlieb, E., Mäs, S., Boley, C., Trauner, F.-X., Wiesel, J. und Richter, D. (2007): Development of suitable information systems for early warning systems (EGIFF). Stroink, L. (ed.): *Geotechnologien. Science Report No. 10. Kick-Off-Meeting 10. October 2007*, Technische Universität Karlsruhe, 113-123.
- Breunig, M., Broscheit, B., Reinhardt, W., Ortlieb, E., Mäs, S., Boley, C., Trauner, F.-X., Wiesel, J., Richter, D., Abecker, A., Gallus, D., Kazakos, W. und Bartels, A. (2008): Towards an information system for early warning of landslides. *EnvironInfo 2008, Lüneburg*, 476-481.
- Dikau, R. und Glade, T. (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau* 54 (1), 38-45.

NDMA (2008): National Disaster Management Authority. Terminology of disaster risk reduction. <http://www.ndma.gov.pk/BooksPublications.html>.

Ortlieb, E., Mäs, S., Reinhardt, W. und Trauner, F.-X. (2008): Coupling Simulations of Landslides with Geoinformation Systems for Decision Support and Early Warning. Proceedings of the 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Girona, Spain.

Ortlieb, E., Reinhardt, W. und Trauner, F.- X. (2009): Developement of a coupled geo information and simulation system for early warning systems. In: Cartographie and Geoinformatics for Early Warning and Emergency Management: Towards better Solutions Proceedings, 19.-22.01.2009; Milan Konecny, Sisi Zlatanova, Temenoujka Bandrova and Lucie Friedmannova (eds.); Prague, Czech Republic.

Trauner, F.-X., Boley, C. und Ortlieb, E. (2008): Coupling of geotechnical models and GIS for early warning purposes exemplified on landslides. Resources and Risks in the Earth System - International Conference and 106th annual meeting of the Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften and 98th annual meeting of the Geologische Vereinigung e.V. (Geo2008), Aachen, SDGG Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 60.

Werner-Allen G., Johnson J., Ruiz M., Lees J. und Welsh M. (2005): Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network. Proc. 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '05), IEEE Press, pp. 108-120.