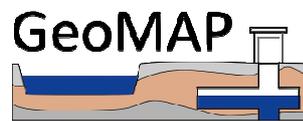




Europäische Union. Europäischer  
Fonds für regionale Entwicklung.  
Evropská unie. Evropský fond pro  
regionální rozvoj.



## Zusammenfassung des 3. Projekt-Workshops GeoMAP

„Möglichkeiten der computergestützten Simulation von Grundwasser- und Grubenwasseranstieg: Hebungen/Senkungen und deren Auswirkungen auf Umwelt und Infrastruktur im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz“

„Možnosti počítačové simulace vzestupu podzemní a důlní vody: Vzestupy / poklesy a jejich dopady na životní prostředí a infrastrukturu v černouhelné oblasti Lugau / Oelsnitz “

Gustav-Zeuner-Str. 1a, 09599 Freiberg

**am 08.10.2019**

Am 08.10.2019 organisierte der Projektpartner PP1a Institut für Geotechnik (TU Bergakademie Freiberg) den dritten Workshop im Rahmen des Projektes GeoMAP. Der Workshop gab den Projektpartnern einen Überblick über die Möglichkeiten der computergestützten Simulation von Grund- und Grubenwasser(anstieg) u.a. im Kontext des Altbergbaus. Neben dem hydraulischen Verhalten des Untergrundes im Altbergbaugebiet wurde auch das mechanische Verhalten der Gesteinseinheiten diskutiert. Während des Workshops wurden Präsentationen aus verschiedenen Anwendungsbereichen computergestützter Simulationen im Bereich Geotechnik vorgestellt und die wesentlichen Erkenntnisse und Erfahrungen mit den Teilnehmern diskutiert.

Dne 08.10.2019 uspořádal projektový partner PP1 a Institut geotechniky (TU Báňská akademie Freiberg) třetí workshop v rámci projektu GeoMAP. Workshop poskytl projektovým partnerům přehled o možnostech počítačem podporované stimulace (vzestupu) podzemních a důlních vod mimo jiné v kontextu staré těžby. Kromě diskuse na téma hydraulického chování podloží se diskutovalo také o mechanickém chování jednotek hornin. Během workshopu byly představeny prezentace z různých oblastí aplikace počítačem podporovaných simulací v oblasti geotechniky a proběhla diskuse s účastníky o hlavních poznatcích a zkušenostech.

### Programm:

9:30 – 10:00	Anmeldung
10:00 – 12:00	<b>Präsentationen</b> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Numerische Simulation der Interaktion unterirdischer Hohlräume mit dem Grundwasser (Prof. <i>Christoph Butscher</i>)</li><li>2. Numerische Verfahren zur geomechanisch-hydraulischen Modellierung (Prof. Heinz Konietzky)</li><li>3. Aktueller Stand der numerischen Modellierungen im Projekt GeoMAP (Gunther Lüttschwager)</li></ol>
12:00 – 13:00	Mittagspause
13:00 – 14:00	<b>Laborführung:</b> Gesteinsmechanisches Labor des IfGT

# **Numerische Simulation der Interaktion unterirdischer Hohlräume mit dem Grundwasser**

*Prof. Dr. Christoph Butscher*

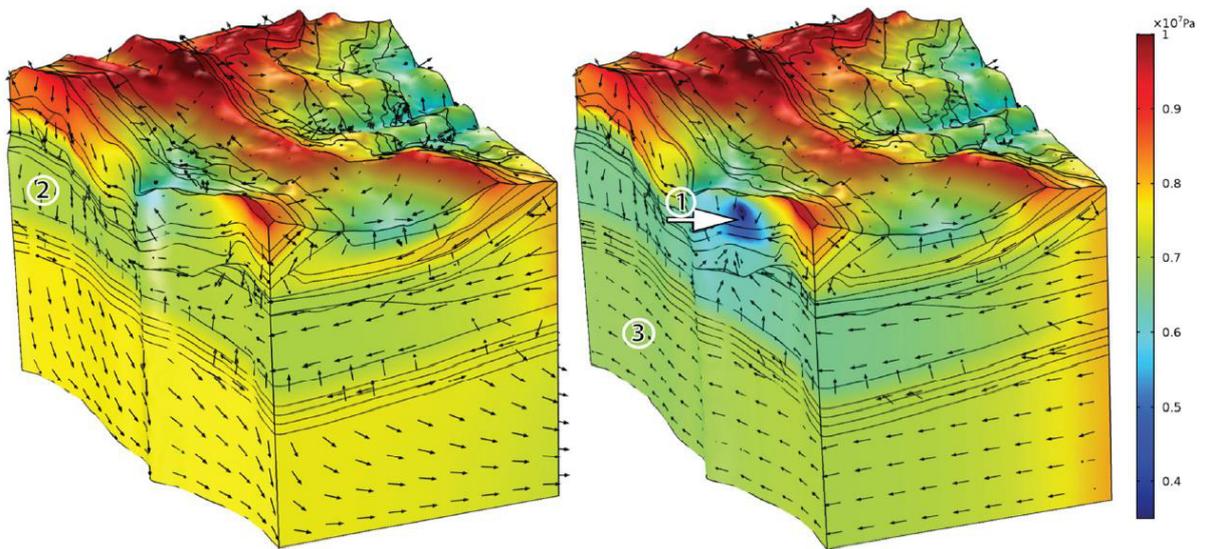
*TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik*

*Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Umweltgeotechnik*

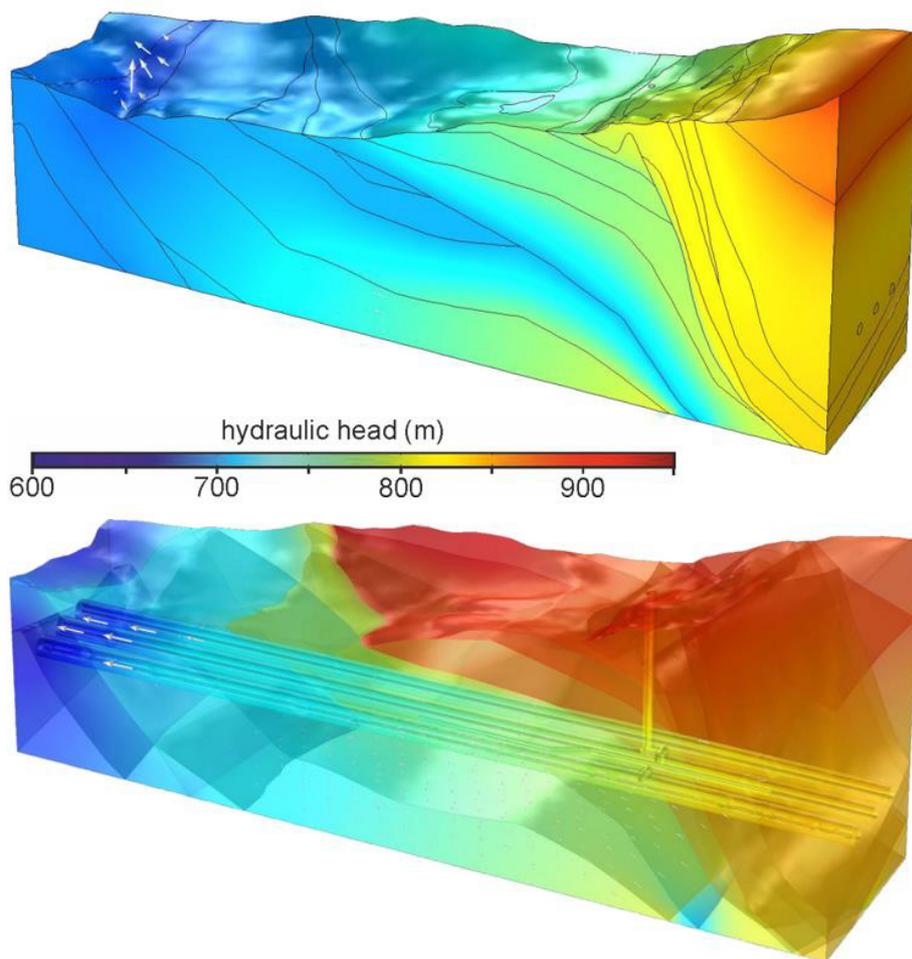
Unterirdische Hohlräume haben einen großen Einfluss auf das Grundwasser. Der Bau von Tunnels, Stollen und Schächte kann die natürlichen Strömungsverhältnisse nachhaltig verändern. Weitere menschliche Eingriffe, wie z. B. Grundwasserentnahmen oder Drainagen, machen die Situation noch komplizierter. Simulationen mit numerischen Grundwassermodellen erlauben Geologen und Ingenieuren, die Interaktion zwischen unterirdischen Hohlräumen und dem Grundwasser nachzubilden, und damit auch die Auswirkungen menschlicher Eingriffe besser zu quantifizieren.

Der Beitrag stellt zunächst die Faktoren vor, welche die Interaktion unterirdischer Hohlräume mit dem Grundwasser bestimmen. Dazu zählen die unterirdischen Hohlräume selbst, aber auch die hydraulischen Eigenschaften des geologischen Untergrunds und ihre Verteilung, sowie hydrologische Randbedingungen. Anschließend wird gezeigt, wie unterirdische Hohlräume in numerischen Grundwassermodellen abgebildet werden können.

Anhand zweier Fallbeispiele wird die Anwendung numerischer Modelle für die Simulation der Interaktion zwischen unterirdischen Hohlräumen und dem Grundwasser veranschaulicht. Am Beispiel des Belchentunnels im Schweizer Jura werden einerseits Änderungen des regionalen Fließfelds durch den Tunnel aufgezeigt (Abb. 1). Andererseits wird der Einfluss hydraulischer Maßnahmen auf Wasserflüsse im lokalen Tunnelumfeld vorgestellt (Abb. 2). Das zweite Beispiel behandelt den Schadensfall in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Dort traten nach der Installation von Erdwärmesonden Quellhebungen an der Oberfläche auf, welche zu großen Schäden an Häusern führte. Diese Hebungen entstanden durch den Zutritt von Wasser in Gesteine des Gipskeupers über die Erdwärmesondenbohrungen. Der Gipskeuper enthält Anhydrit, welcher mit Wasser zu Gips reagiert. Die Reaktion ist verbunden mit einer Volumenzunahme. Gezeigt werden die simulierten Änderungen des Fließfelds, die durch die Erdwärmesonden hervorgerufen wurden, sowie solche, die sich aus hydraulischen Sanierungsmaßnahmen ergaben. Das Beispiel zeigt ebenfalls, wie mit dem numerischen Modell auch geochemische Prozesse in der Quellzone sowie geomechanische Auswirkungen, nämlich die Hebungen an der Erdoberfläche, simuliert werden können.



**Abb. 1:** Berechnete hydraulische Druckverteilung und Fließrichtungen im *regionalen* Umfeld des Belchentunnels vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts) (aus: Scheidler et al. 2019).



**Abb. 2:** Berechnete hydraulische Druckverteilung und Fließrichtungen im *lokalen* Umfeld des Belchentunnels vor (oben) und nach dem Tunnelbau (unten) (aus: Butscher et al. 2017).

# **Ausgewählte Aspekte zu numerische Berechnungsverfahren in der Geotechnik**

H. Konietzky

*TU Bergakademie Freiberg*

An numerische Berechnungsmethoden in der Geotechnik werden besondere Anforderungen gestellt, die sich von den sonst üblichen im Ingenieurwesen zumindest partiell deutlich unterscheiden. Dies betrifft folgende Aspekte:

- Ausgeprägte Anisotropien und Inhomogenitäten in Bezug auf Deformation und Festigkeit (Klüfte, Störungszonen, Schieferungen, Einschlüsse etc.)
- Meist sehr schwache Datenbasis (begrenzte Kenntnis über geologischen Untergrund, begrenzte Kenntnis über Materialverhalten der geologischen Einheiten etc.)
- Stark ausgeprägte Maßstabeffekte in Raum und Zeit
- Stark ausgeprägte und komplexe Kopplungen (thermisch – mechanisch – hydraulisch – chemisch –biologisch)
- Spezifische Anfangs- und Randbedingungen (Primärspannungsfeld, Halb- oder Vollraum etc.)
- Dominante Druckspannungen
- Signifikante Unterschiede zwischen Be- und Entlastung
- Stark nicht-elastische Prozesse und große Deformationen (hardening, softening, etc.)
- Keine Prototypen verfügbar
- Notwendigkeit spezieller Elementtypen zur Abbildung bautechnischer Elemente (Anker, Geotextilien etc.)
- Spezifische Stoffgesetze zur Abbildung der Spannungs-Deformations-Verhaltens von Böden bzw. Fels

Aufgrund dieser Spezifika werden in der Geotechnik meist Spezialprogramme eingesetzt, die diese Anforderungen erfüllen. Die Alternative sind Multi-Purpose-Programme, die individuell angepasst werden müssen. Generell kann man zwischen Integral- und Differentialmethoden unterscheiden. Typische Vertreter der Differentialmethoden sind:

- Finite-Elemente-Methode
- Finite-Volumen-Methode
- Finite-Differenzen-Methode

Die Integralmethoden basieren im Wesentlichen auf der Rand-Elemente-Methode und besitzen in der Geotechnik eine nur sehr untergeordnete Bedeutung. Die Vor- und

Nachteile (+ vs -) der Integral- und Differentialmethoden aus Sicht der Geotechnik sind folgende:

Integralmethoden:

- + einfache Vernetzung (nur Oberfläche)
- + exakte Formfeldbeschreibung
- + minimaler Diskretisierungsfehler
- + hohe Rechengeschwindigkeit, geringer Speicherbedarf
- + kein Problem mit singulären Punkten
- Problem bei Inhomogenitäten, Anisotropien, Kopplungen

Differentialmethoden:

- + geeignet für Inhomogenitäten, Anisotropien, Kopplungen, Nichtlinearitäten
- + hohe Flexibilität für kontinuumsmechanische Probleme
- höhere Rechenzeiten, höherer Speicherbedarf
- komplizierte Vernetzung
- Schwierigkeiten bei signifikanten Punkten
- Diskretisierungsfehler

Alternativ zu den vorgenannten kontinuumsmechanischen Ansätzen spielen netzfreie Methoden eine zunehmende Bedeutung in der Geotechnik. Sie lassen sich bzgl. ihrer Vor- und Nachteile wie folgt charakterisieren:

Netzfrie Methoden:

- + geeignet für diskontinuumsmechanische Problem
- + geeignet für Bruch- und Schädigungsmechanik
- + geeignet für Partikelsimulation und Massentransport
- + geeignet für exakte Abbildung der geometrischen Struktur
- sehr lange Rechenzeiten
- komplizierter Modellaufbau
- komplizierte Parameterbestimmung

Typische Vertreter der netzfreien Methoden sind Partikelmethode, Smooth-Particle-Hydrodynamics oder Diskrete-Elemente-Verfahren. Exemplarisch für die netzfreien Methoden sei das Berechnungskonzept der Distinkte-Elemente-Methode gezeigt (Abb. 1), welches entweder mit starren oder deformierbaren Grundkörpern arbeitet.

Ob ein kontinuums- oder diskontinuums-mechanischer Ansatz für die zu lösende Aufgabenstellung zu favorisieren ist, hängt u.a. auch von zu betrachtenden repräsentativen Elementarvolumen (REV) ab. Abb. 2 zeigt am praktischen Beispiel verschieden große Beobachtungsräume, die vom intakten Gestein (Kontinuum) über ein System von Einzelklüften (Diskontinuum) bis hin zum großräumig geklüfteten Gebirge (Kontinuum mit reduzierten Eigenschaften) führen.

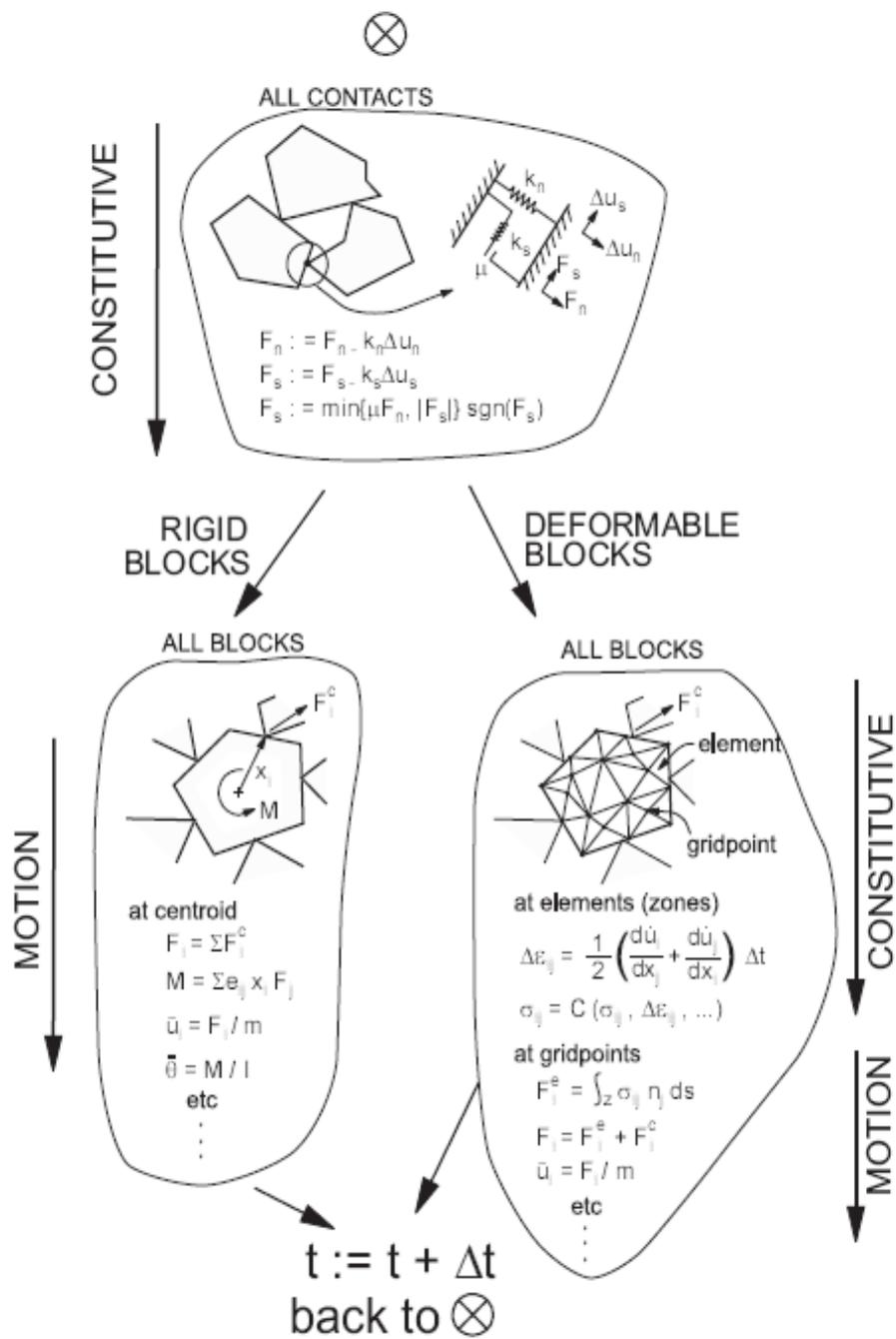


Abb. 1: Berechnungszyklus der Distinkte Elemente Methode (Itasca, 2017)

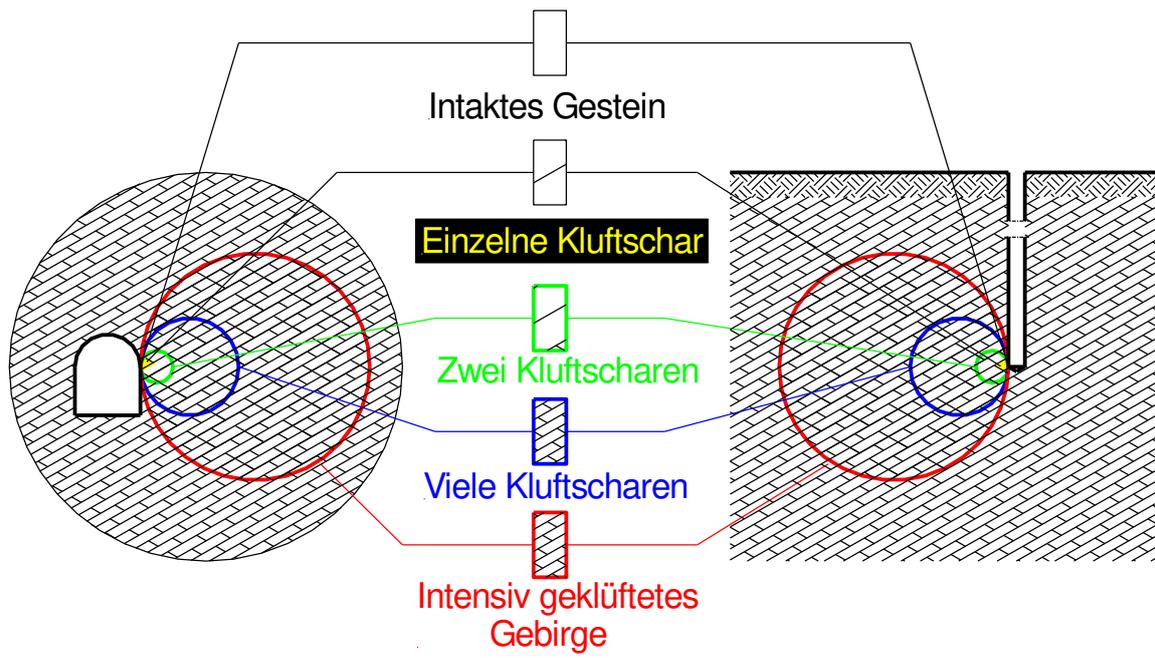


Abb. 2: Illustration zum Begriff Repräsentatives Elementarvolumen (REV)

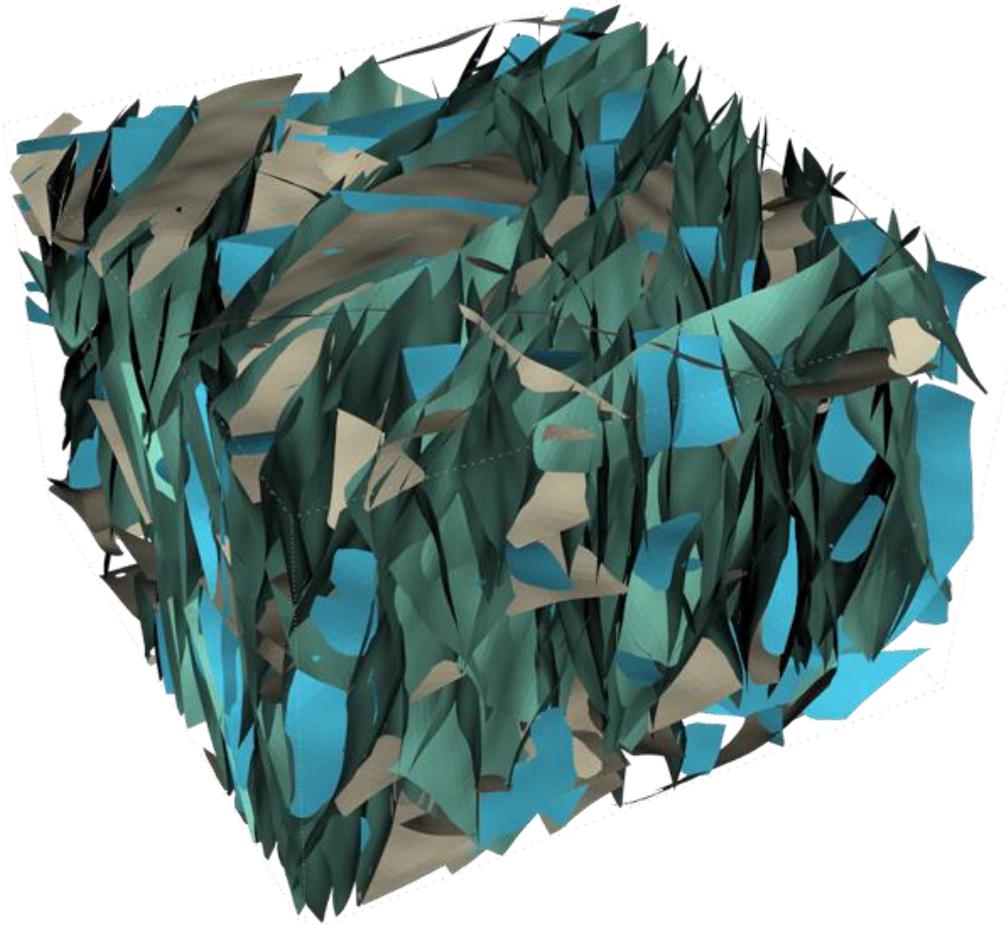


Abb. 3: Exemplarische Darstellung eines Discrete Fracture Networks (DFN)

Ein ganz wesentliches Element einer fels- bzw. gebirgsmechanischen Betrachtung sind Diskontinuitäten. Diese können je nach verwendetem Tool in unterschiedlicher Weise abgebildet werden:

- als diskretes Kluftnetzwerk (Discrete Fracture Network = DFN), wie beispielhaft in Abb. 3 gezeigt. In Verbindung mit der DEM können komplexe hydro-mechanisch gekoppelte Probleme abgebildet werden.
- als wenige einzelne diskrete Interfaces in kontinuumsmechanischen Codes
- als verschmierte Schwächeflächen in den Zonen kontinuumsmechanischer DEM basierter Codes
- als punkt-, linien-, oder flächenhafte Kontakte in partikelbasierten Ansätzen

Als zukünftige Entwicklungstendenzen sind folgende zu sehen:

- Kopplung verschiedener numerischer Berechnungstechniken (z.B. Kontinuum und Diskontinuum oder Mechanisches Tool mit CFD-Tool etc.
- Integration der numerischen Berechnungen in GIS bzw. BIM
- Cloud Computing
- Kopplung von Optimierungstool mit numerischen Programmen