



## Betrachtungen zur Problematik von Hochbrüchen im geplanten Bergwerk „Altertheim“

Auftraggeber: Knauf Gips KG  
Am Bahnhof 7  
97346 Iphofen

Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Heinz Konietzky  
Dr. rer. nat. Martin Herbst

.....  
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

Datum: 05.08.2024

**Die im Bericht getroffenen Aussagen und entwickelten Lösungsansätze gelten stets für die genannten Parameter (Anfangs- und Randbedingungen, Materialkennwerte etc.). Eine Übertragung auf andere Konstellationen ist ohne vorherige Prüfung nicht zulässig.**

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| 1. Einleitung / Aufgabenstellung.....  | 3  |
| 2. Analyse Hochbruchgefahr mittels partikelbasierter numerischer Simulation..... | 4  |
| 2.1 Modellaufbau und Parameter.....  | 4  |
| 2.2 Berechnungsergebnisse .....  | 11 |
| 3. Zusammenfassende Bewertung .....  | 14 |
| 4. Literaturverzeichnis .....  | 15 |

## 1. Einleitung / Aufgabenstellung

Die Fa. Knauf plant ein neues untertägliches Bergwerk im Raum Altertheim (Bayern). Dazu wurden Erkundungsbohrungen und entsprechende Bohrlochversuche sowie Versuche an Bohrkernen durchgeführt. Die gewonnenen Kerne wurden im gesteinsmechanischen Labor der TU Bergakademie Freiberg untersucht und entsprechende gesteinsmechanische Parameter bestimmt. Diese bilden in Kombination mit in-situ Bohrlochmessungen die Grundlage für die erbrachten Standsicherheitsnachweise der geplanten Grube sowie dem Nachweis des Erhalts der Barriereintegrität in Bezug auf den Hauptgrundwasserleiter. Die Barriere wird durch eine mehrere Meter mächtige Ton-Sulfat-Wechselagerung gebildet. Durch die gewählte Dimensionierung liegt damit ein langfristig ohne Ausbau standsicheres Kammer-Pfeiler-System vor. Das bedeutet auch, dass eine Tagesbruchgefahr ausgeschlossen werden kann. Siehe dazu Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024 sowie Morgenstern & Konietzky, 2023.

Trotzdem wurden von Konietzky & Herbst (2024) analytisch-empirische und numerische Berechnungen (kohäsionsloses Material mit Reibungswinkel 0) vorgestellt, die unter Annahme dieser extrem konservativen Bedingungen zeigten, dass schon rein geometrisch ein Hochbruch die Erdoberfläche nicht erreichen kann.

In diesem Bericht werden realitätsnähere, aber immer noch konservative Berechnungen vorgestellt, die die potentielle Entwicklung eines Hochbruchs über einem Streckenkreuz aufzeigen. Im Streckenkreuz wird die größte offene Spannweite erreicht, damit ergeben sich auch die kritischsten Spannungen.

## 2. Analyse Hochbruchgefahr mittels partikelbasierter numerischer Simulation

### 2.1 Modellaufbau und Parameter

Die partikelbasierten Simulationen bauen auf dem von Konietzky & Herbst (2024) vorgestellten Modell unter Verwendung von PFC3D (Vers. 7.0) der Firma ITASCA auf. Dabei wird ein Streckenkreuz abgebildet und die Entwicklung eines etwa zylinderförmig verlaufenden Hochbruchs simuliert. Die dabei entstehenden Bruchmassen können in die angrenzenden Strecken auslaufen, wobei diese Massenbewegung realitätsnah durch Reibung sowie formgebundene Bewegungsbehinderung der Bruchmassen (Pfeiler) bis hin zur Bildung von Schüttkegeln abgebildet wird und damit auch das ‚Totlaufen‘ des Hochbruchs oder auch die Stabilisierung durch Gewölbebildung in der Firste erfasst.

Die geometrischen Abmaße des Modells entsprechen den realen Verhältnissen:

- Abbauhöhe = 7 m
- Kammerbreite = 8 m
- Pfeilerbreite = 21 m
- Überlagerungshöhe = 140 m

Die Berechnungen erfolgen konservativ und unterstellen einen Auflockerungsgrad von etwa 1,5. Gebirge bzw. Bruchmassen werden durch sogenannte ‚Clumps‘ (Kugelpackungen aus 2 bis 3 Kugeln) repräsentiert. Es wird ein zylinderförmiger Hochbruch über dem Streckenkreuz mit einem Durchmesser von 12 m unterstellt. Das reibungsbehaftete Materialverhalten der Bruchmasse ist so kalibriert, dass sich bei Eintritt in den Abbauhohlraum ein Schüttwinkel von nahezu 40° einstellt. Der entsprechende Reibungswinkel wird aber erst aktiviert, wenn die Bruchmassen den Abbauhohlraum erreichen. Solange sich die Bruchmassen noch oberhalb der Firste befinden, wird der Reibungswinkel der einzelnen Schichten auf einen geschätzten Restreibungswinkel gemäß Tabelle 1 gesetzt.

Tab. 1: Reibungswinkel der modelltechnisch relevanten Schichten

| Schicht                                    | Spitzenreibungswinkel [°] | Restreibungswinkel, realistisch [°] | Restreibungswinkel, konservativ [°]                     |
|--|---------------------------|-------------------------------------|---|
| res2<br>(Residualgebirge)                  | 24.2                      | 16                                  | 13  |
| hkh = GWL<br>(Mittlere Dolomite)           | 50.2                      | 33                                  | 22<br>(jeweils noch leicht reduziert wegen Wasserdruck) |
| y-lg = TSW<br>(Ton-Sulfat-Wechsellagerung) | 43.3                      | 28                                  | 19  |
| Y2<br>(Gipslager)                          | 46                        | 26                                  | 17  |

Tab. 2: Rechenfälle

| Schicht                                     | Modell x1                 | Modell x2                               | Modell x3                |
|---|---------------------------|---|--------------------------|
| Grundwasserpotentiale gemäß Abb. 1          | 26 mWs                    | 34 mWs                                  | 10 mWs                   |
| Ausbildung der Firste (von unten nach oben) | 10.00 m TSW<br>5.36 m GWL | 3.85 m Gips<br>5.15 m TSW<br>7.43 m GWL | 9.45 m TSW<br>5.38 m GWL |

Das numerische Berechnungsmodell unterstellt folgende generelle Situation:

Der Abbauhohlraum (Bereich Streckenkreuz) ist trocken bzw. luffertfüllt. In der Firste über dem Streckenkreuz befindet sich eine Barriere-Formation (TSW bzw. lokal Gips) von ca. 10 m Mächtigkeit (siehe dazu im Detail die Rechenfälle x1, x2 und x3 bzw. Tab. 2). Auch diese Barriereformation ist trocken. Darüber befindet sich der untere gespannte Grundwasserleiter hkh mit lokal unterschiedlichen Wasserdrücken gemäß Abb. 1 bzw. Tab. 2. Das Deckgebirge oberhalb des GWL wird konservativ bis zur Erdoberfläche als Residualgebirge (res2) abgebildet. Die Rechnung unterstellt nun, dass sich über dem Streckenkreuz durch zeitlich fortschreitende Rissbildung ein zylindrischer Körper mit ca. 12 m Durchmesser ausbildet, der bis an die Unterkante des Grundwasserleiters reicht. Diesem Bereich wird nur die Restfestigkeit zugeordnet, d. h. die Kohäsion ist Null und es wirken nur die konservativen Restreibungswinkel gemäß Tab. 1.

Die Restreibungswinkel sind weder in-situ noch im Labor ermittelt worden, allerdings gibt es gute Ansatzpunkte sie zu schätzen, indem man folgende Aspekte berücksichtigt (siehe z.B. auch: Rabat et al. (2022), Singh & Goel (2012), Cafaro et al. (2022), Lama & Vutukuri (1978)):

- (1) Der Restreibungswinkel entspricht in etwa dem Basisreibungswinkel, für den umfangreiche Literaturwerte für die verschiedensten Gesteins- und Bodenarten vorliegen.
- (2) Der Restreibungswinkel ist nahezu immer kleiner als der Spitzenreibungswinkel, der damit eine obere Grenze darstellt.
- (3) Der Restreibungswinkel kann als Differenz zwischen Spitzenreibungswinkel und Dilatanzwinkel angegeben werden (Schätzwert), wobei man den Dilatanzwinkel ganz grob mit 1/3 des Spitzenreibungswinkels annehmen kann.
- (4) Die umfangreichen Literaturangaben zu gemessenen Restreibungswinkeln zeigen, dass er für Ton- und Sulfatgesteine sowie Gipsstein kaum unter 20° liegt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden für die Rechnungen die in Tab. 1 gezeigten „Restreibungswinkel, konservativ“ verwendet. Es sollte beachtet werden, dass im potentiellen Bruchkörper bzgl. der Festigkeit nur die konservativen Restreibungswerte, aber keinerlei Kohäsion oder Zugfestigkeit wirken (konservative Annahme).

Im GWL (hkh) wirken Effektivspannungen, die mit dem relativ einfachen hier verwendeten Ansatz nicht explizit im Sinne einer hydro-mechanischen Kopplung berücksichtigt werden können. Allerdings lässt sich dieser Effekt durch einen nochmals reduzierten Reibungswinkel abbilden, der aus dem maximalen Wasserdruck und der wirkenden Vertikalspannung abgeleitet wurde. Die angesetzten Reduktionsfaktoren für den

Reibungskoeffizienten betragen für die 3 gewählten Punkte x1, x2 und x3 jeweils 0.91, 0.89 und 0.96. Damit werden für die Schicht hkh (= GWL) im Modell x1, im Modell x2 und im Modell x3 folgende Reibungswinkel angesetzt: 21.2°, 19.8° und 20.2°.

Die Einwirkungen des Grundwassers sind im Wesentlichen durch den Porenüberdruck gekennzeichnet. Eine Einwirkung von Strömungskräften wurde nicht berücksichtigt, spielt aber auch keine Rolle, solange die Fließgeschwindigkeiten gering sind. Damit ergibt sich ein Spannungsanstieg, der generalisiert über eine Dichteerhöhung des aufliegenden Materials realisiert wurde. Im Berechnungsfall x1 beispielsweise sind von der GWL-Oberkante noch 104 m aufliegendes Gebirge zu berücksichtigen. Um einen zusätzlichen Wasserdruck an der GWL-Oberkante von 0.1 MPa zu erreichen, muss die Dichte des überliegenden Materials hier um knapp 100 kg/m<sup>3</sup> angehoben werden.

Das resultierende PFC3D-Modell ist in verschiedenen Ansichten und Darstellungen in den Abbildungen 2 bis 5 zu sehen.

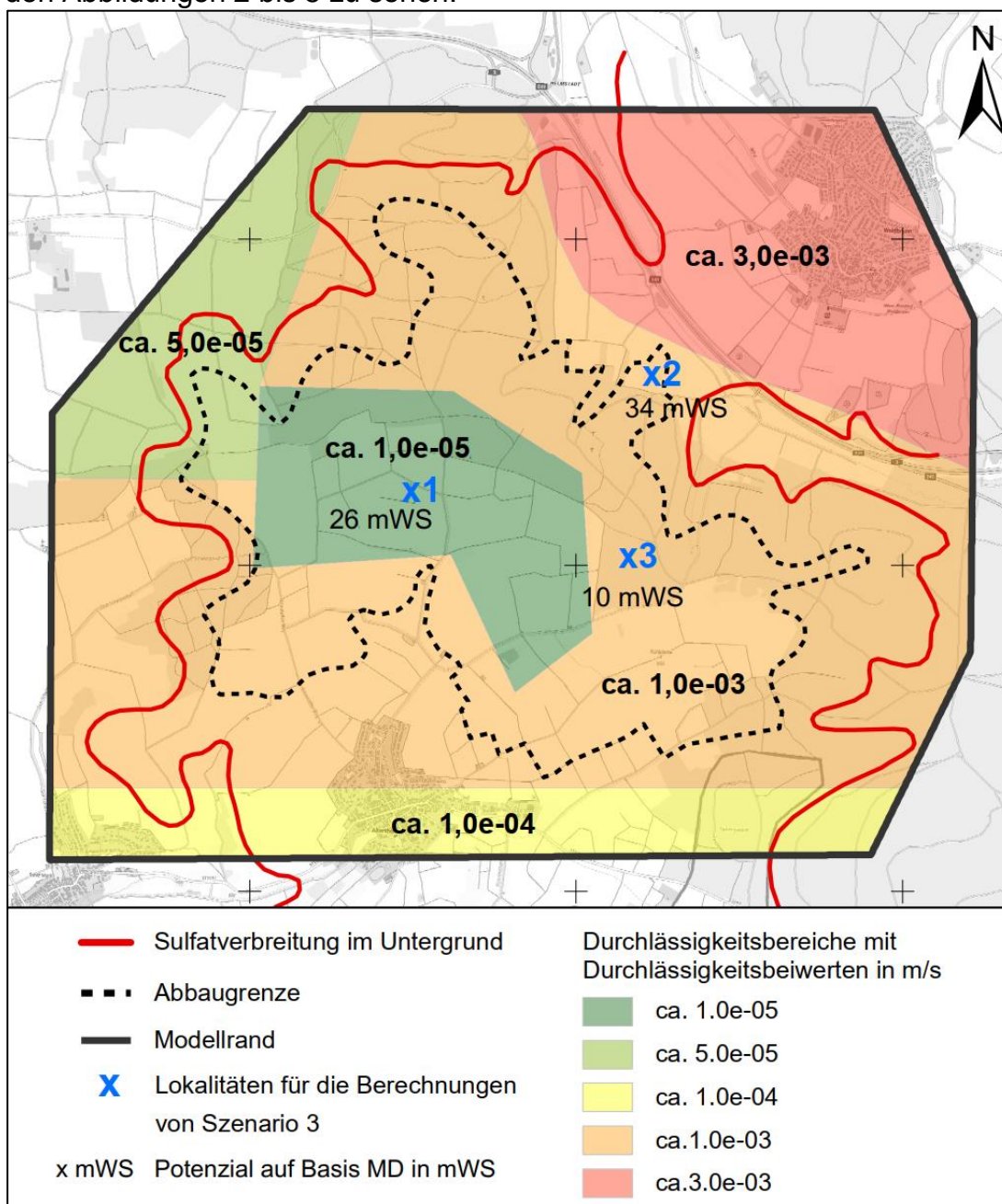


Abb. 1: Grundwasserpotentiale [mWS] für die 3 betrachteten Lokationen x1, x2 und x3 (DMT, 2024)



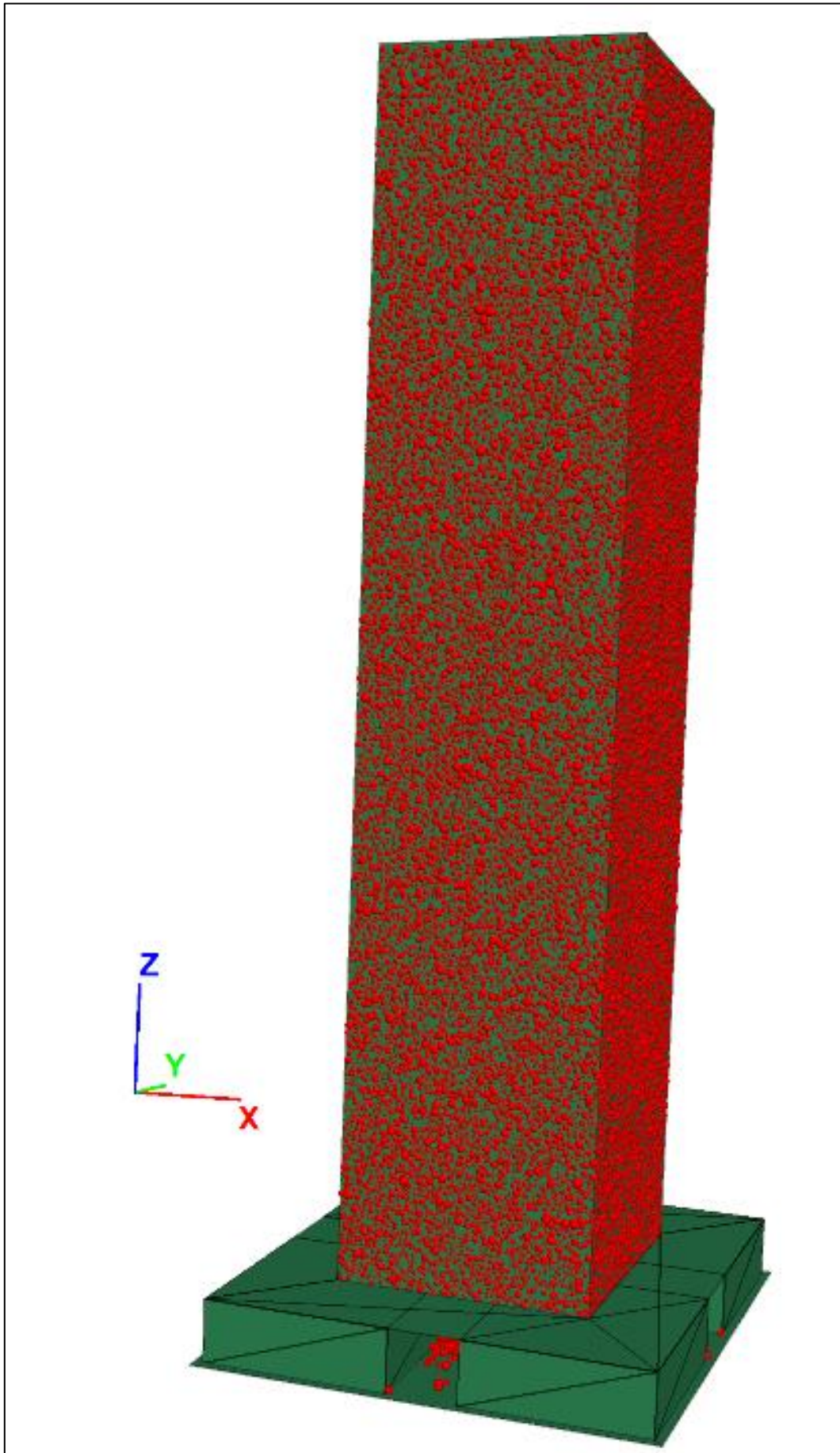


Abb. 2: PFC3D Modellaufbau (Grün: Modellberandungen inkl. Kammer-Pfeiler-System, rot: Gebirge bzw. Bruchmassen) in einem beliebigen fortgeschrittenen Modellierungszustand

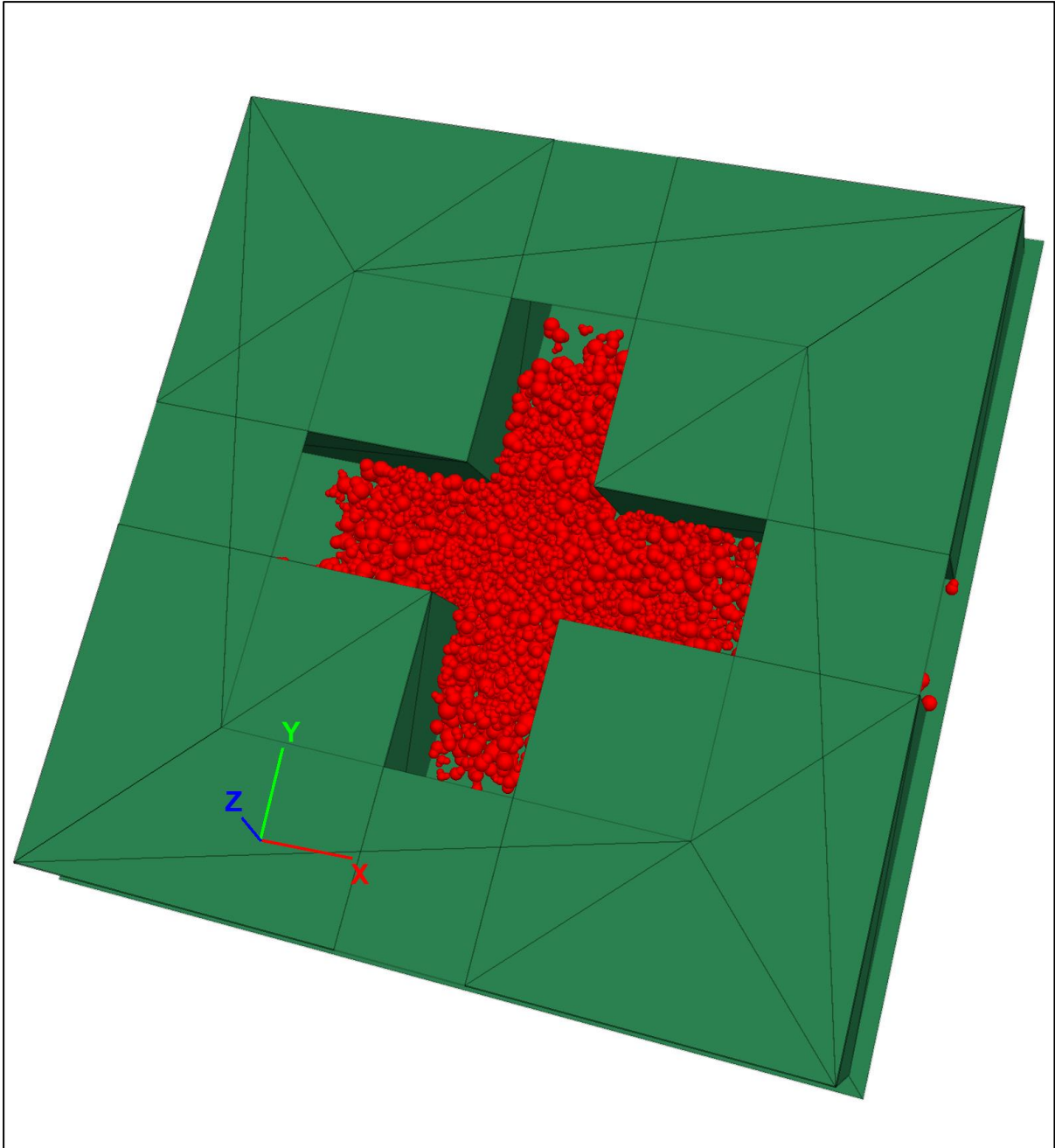


Abb. 3: Unterer Modellbereich mit Kammer-Pfeiler-Struktur (grün) und partieller Verfüllung der Strecken mit Bruchmassen (rot)



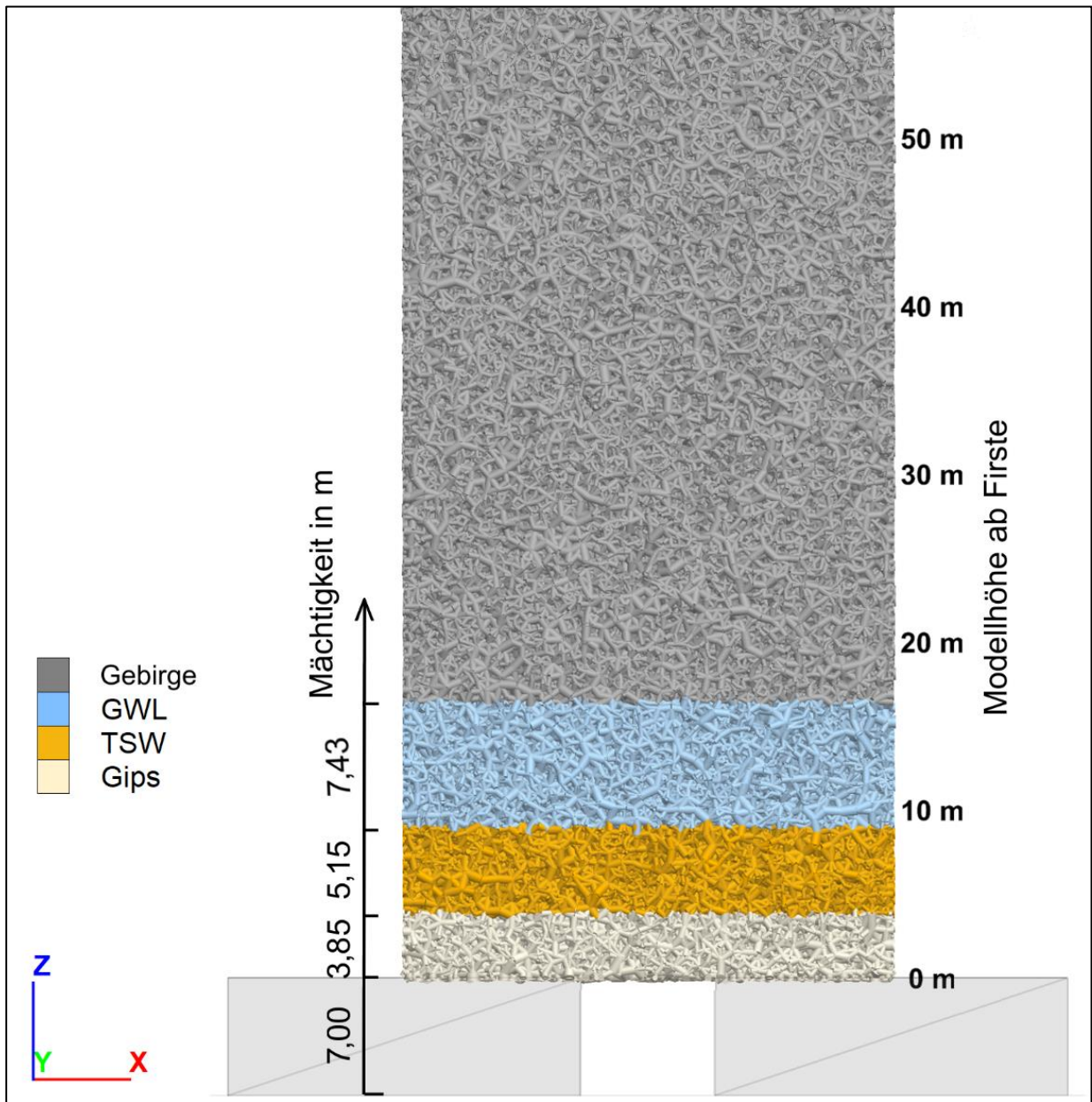


Abb. 4: Unterer Modellbereich mit Schichtgruppierungen für den Berechnungsfall x2 (Modellausschnitt)

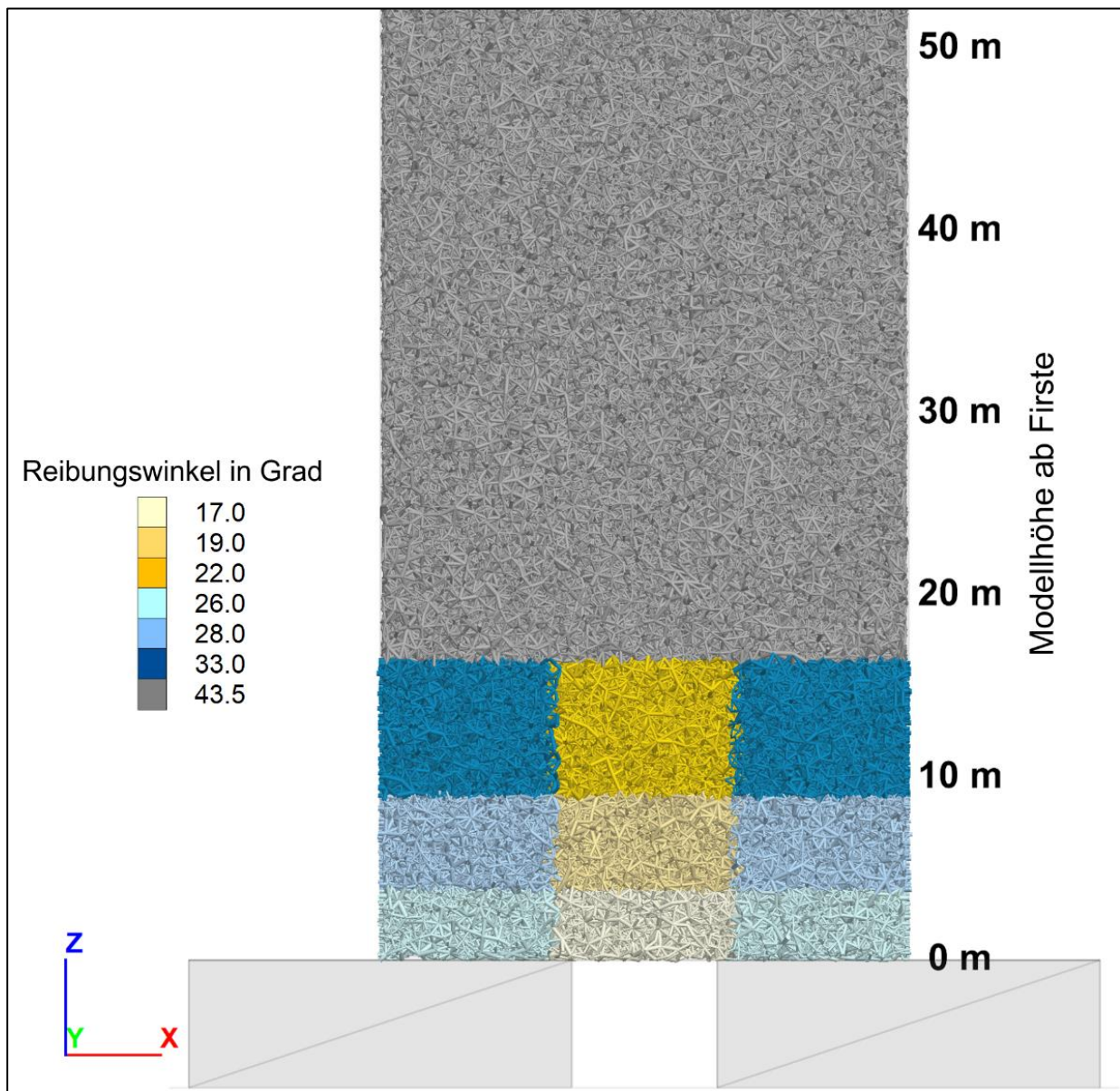


Abb. 5: Unterer Modellbereich mit Reibungswinkeln der einzelnen Bereiche nach Tab. 1 für den Berechnungsfall x2 (Modellausschnitt)

## 2.2 Berechnungsergebnisse

### 2.2.1 Berechnungsfall x1

Der Berechnungsfall x1 ist durch eine 10 m mächtige TSW-Schicht gekennzeichnet, dem eine 5,36 m mächtige GWL-Schicht folgt. In Abb. 6 ist der beginnende Bruchprozess im Schnitt durch das Streckenkreuz in Form der Kontaktketten dargestellt. Man kann deutlich die Ausbildung des Bruchgewölbes durch Zugversagen erkennen. Abb. 7 zeigt den Endzustand des Verbruchs in der Streckenkreuzfirse. Es bildet sich ein Gewölbe mit maximaler Höhe von ca. 3,8 m aus, das sich vollständig in der TSW-Schicht befindet. Dieses Gewölbebildung führt zu einem stabilen Endzustand.

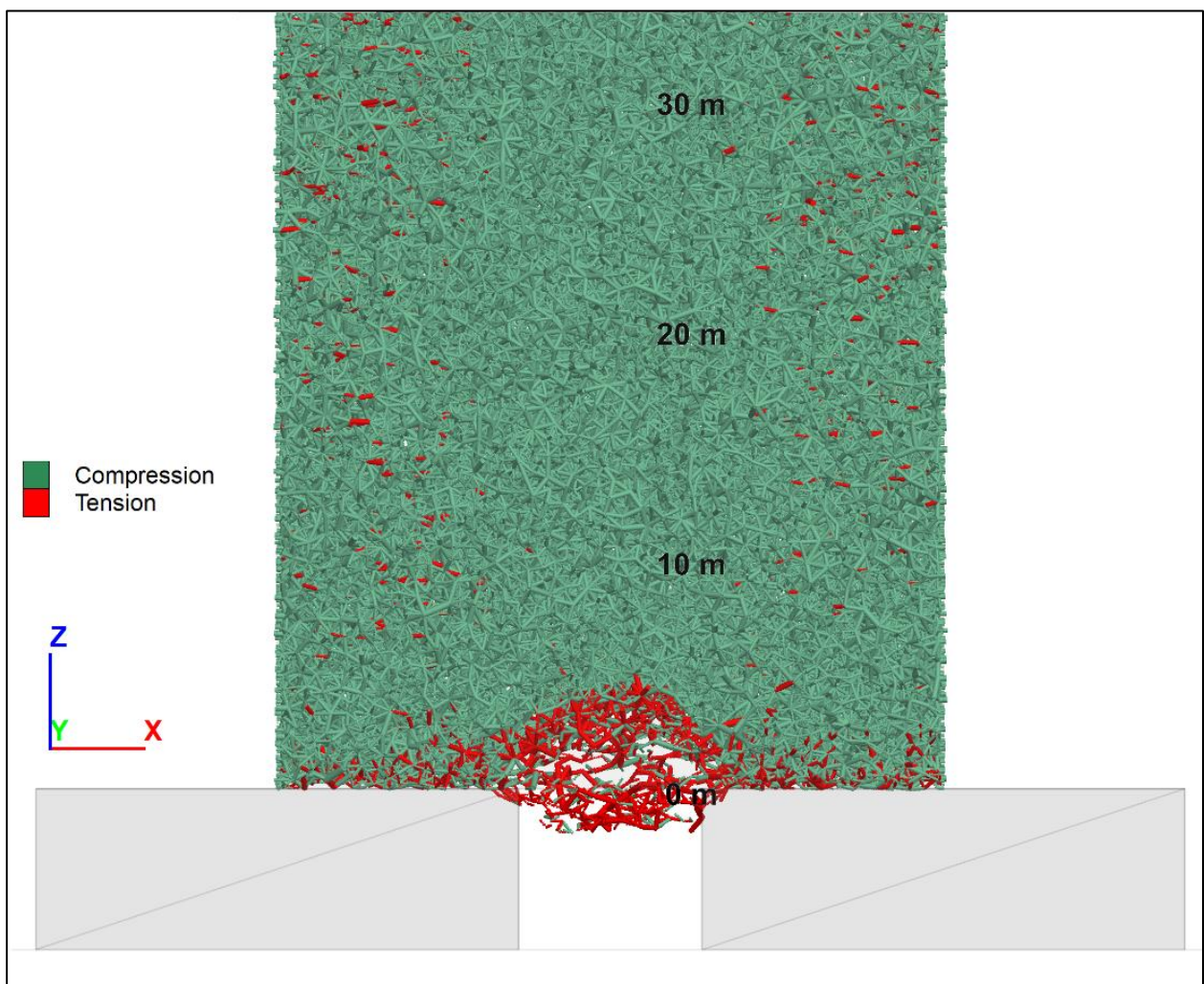


Abb. 6: Kontakte beim beginnenden Verbruch im Berechnungsfall x1 (Modellausschnitt)



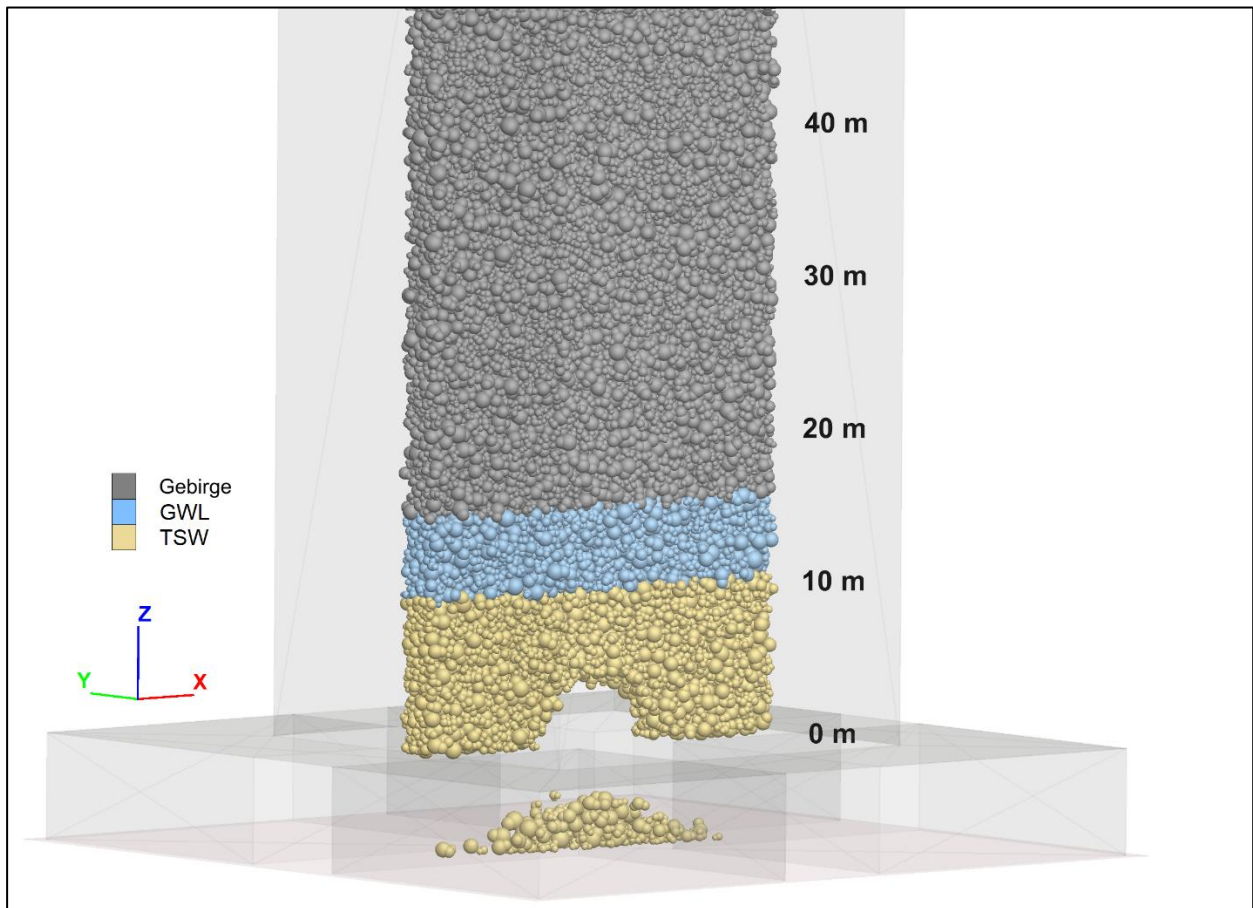


Abb. 7: Endzustand Berechnungsfall x1 (Modellausschnitt)

### 2.2.2 Berechnungsfall x2

Im Berechnungsfall x2 besteht das Hangende der Firste aus einer 3,85 m mächtigen Schicht Gips, der 5,15 m TSW und anschließend 7,43 m GWL folgen (vgl. Abb. 4). In diesem Fall verbricht der Bereich der Gipsschicht vollständig und es kommt in der TSW-Schicht zu einem Ende des Hochbruchs. Der Beginn des Verbruchs ist in Abb. 8 mit den Verschiebungen der ausbrechenden Clumps dargestellt. Das sich ausbildende stabile Gewölbe hat am Ende eine maximale Höhe von ca. 4,5 m (siehe Abb. 9).

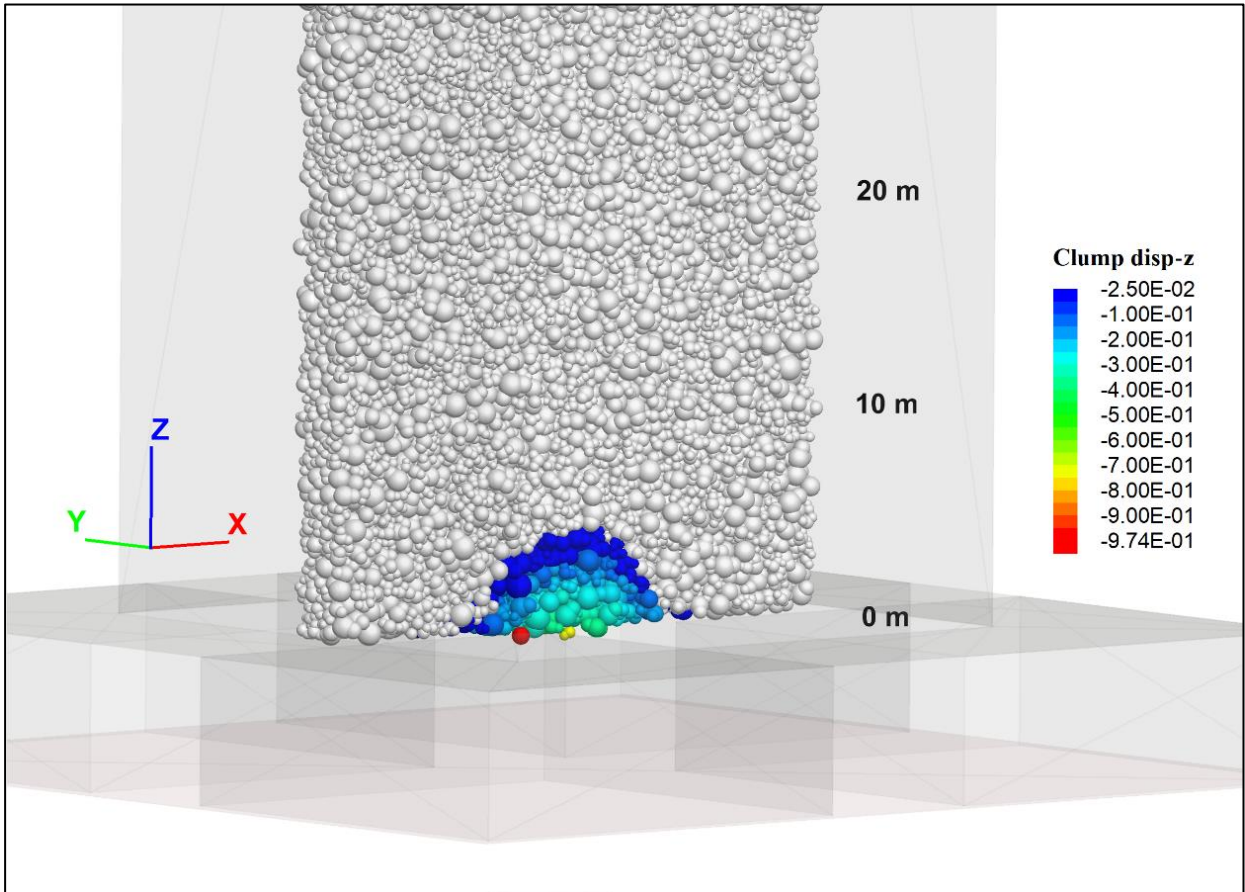


Abb. 8: Beginnende Verschiebungen in m im Berechnungsfall x2 (Modellausschnitt)

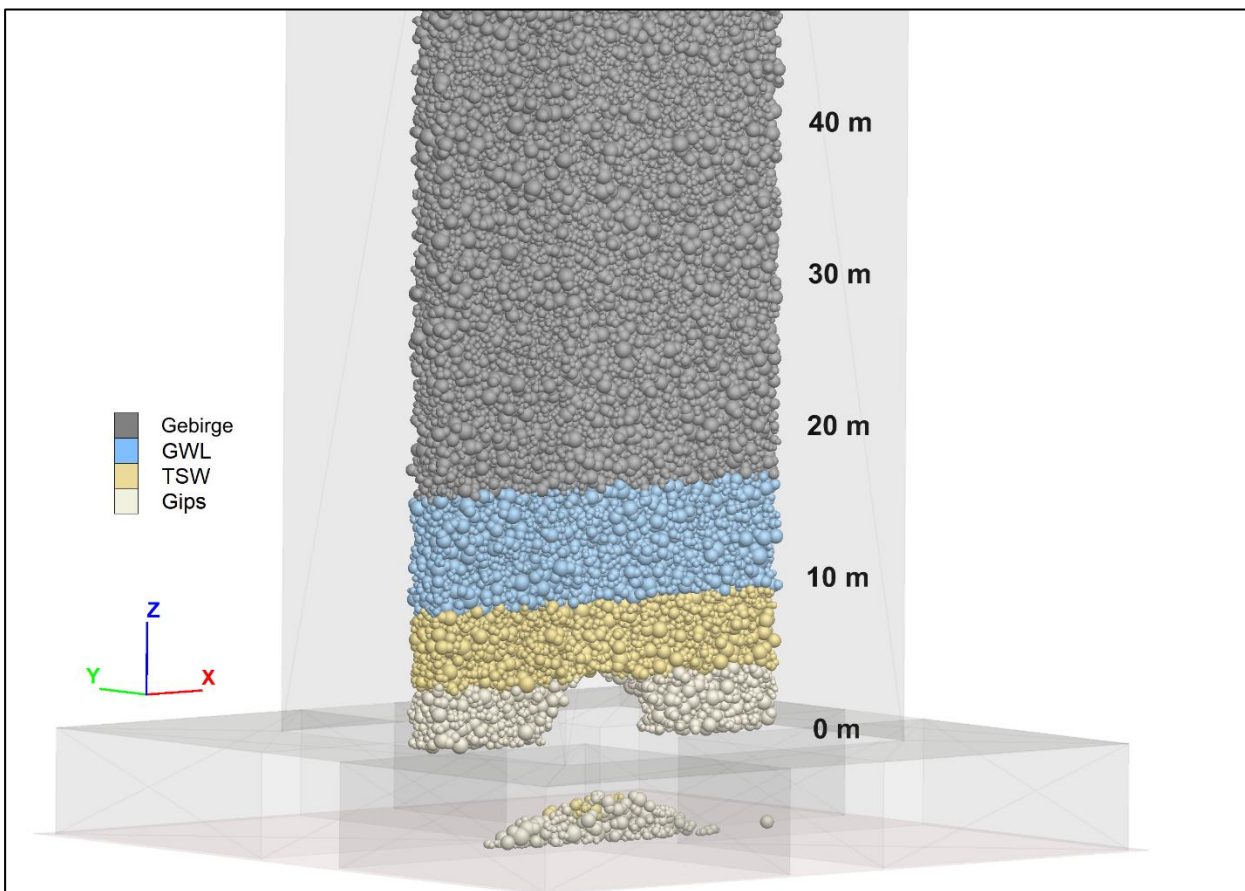


Abb. 9: Endzustand Berechnungsfall x2 (Modellausschnitt)

### 2.2.3 Berechnungsfall x 3

Im Berechnungsfall x3 folgt einer 9,5 m mächtigen TSW-Schicht der GWL mit 5,38 m Mächtigkeit. Dies ist der Fall mit der geringmächtigsten GWL-Schicht. Der Abstand des GWL zur Hohlraumfirse ist ähnlich zu den anderen beiden Berechnungsfällen. Auch dieser Fall unterscheidet sich nicht wesentlich von den Lokationen (Modellen) x1 und x2. Hier bildet sich ein stabiles Gewölbe mit maximaler Höhe von ca. 4,3 m aus, wie in Abb. 9 zu erkennen ist.

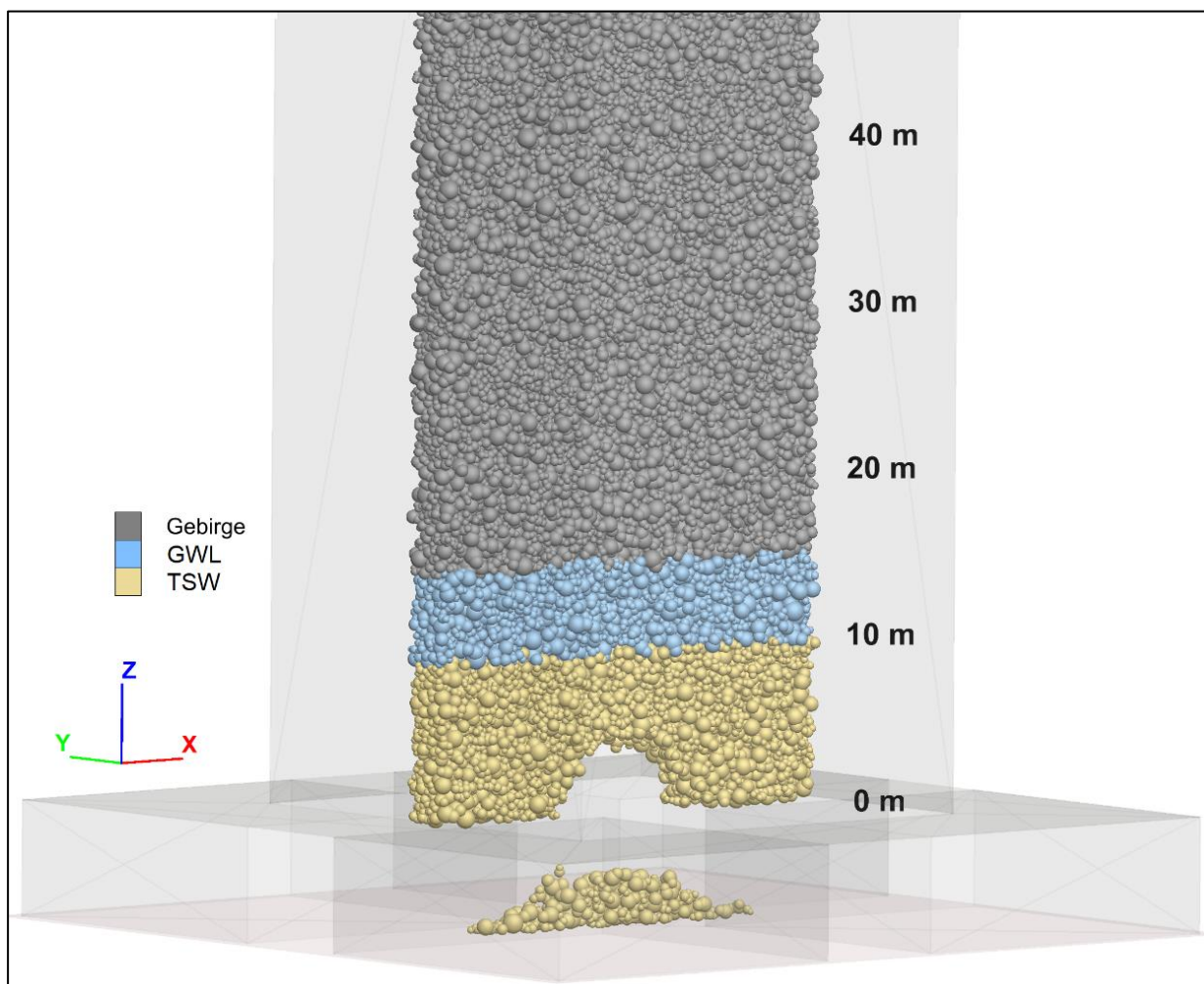


Abb. 10: Endzustand Berechnungsfall x3

### 3. Zusammenfassende Bewertung

Zunächst sei nochmals festgestellt, dass ein Tagesbruch aufgrund der derzeit vorliegenden Daten und der darauf aufbauenden Dimensionierung (siehe Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024, Morgenstern & Konietzky, 2023 sowie Konietzky & Herbst, 2024) ausgeschlossen werden kann. Mit dem aktuellen Ansatz unter Verwendung der in Tab. 1 genannten Reibungswinkel ergeben sich für die Modelle x1, x2 und x3 Bruchbilder, die stets zu stabilen Gewölben mit maximalen Höhen von 4 m bis knapp 5 m führen. In allen drei Fällen endet der Verbruch deutlich unterhalb des GWL in der Schicht TSW und hat damit keinen Einfluss auf diesen. In allen 3 betrachteten Konstellationen stehen damit zwischen höchstem Punkt des Hochbruchs (Gewölbescheitel) und Unterkante GWL noch mindestens 5 m nahezu ungestörtes Gebirge an.



D.h. auch diese wiederum sehr konservative Betrachtung belegt, dass sich ein entwickelnder Hochbruch selbstständig stabilisieren würde und den GWL nicht erreichen würde, so dass ein massives Eindringen von Wasser in den Abbauhohlraum (Wassereintritt) ausgeschlossen ist.

Hochbrüche sind zeitabhängige Bruch- und Schädigungsprozesse, die durch subkritisches und kritisches Risswachstum charakterisiert sind. Der zeitliche Verlauf ist extrem schwer zu prognostizieren. Generell gesehen können derartige Prozesse relativ schnell (Tage bis Wochen) ablaufen, meist aber ziehen sie sich langsam über sehr viele Jahre hinweg hin. Die vorgestellten numerischen Simulationen beinhalten keine Zeitabhängigkeit, sondern betrachten nur den Anfangszustand sowie den stabilen Endzustand.

Klassische Kriechprozesse wie beispielsweise im Salzgebirge relevant, d.h. zeitabhängige Deformationen des Kontinuums, spielen in diesem Kontext keine signifikante Rolle.

Im Übrigen lässt sich ein Grundbruch aufgrund der Lasten-, Geometrie- und Parametersituation ausschließen.

#### 4. Literaturverzeichnis

- Cafaro, F. et al. (2022): Does water lubrication affect friction differently for rock and soils ? Evidence and open questions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 44(3): 211-223
- DMT (2024): schriftliche und mündliche Mitteilungen
- Konietzky, H. Herbst, M. (2024): Betrachtungen zur Tagesbruchproblematik für das geplante Bergwerk „Altertheim“, 05.08.2024
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S. (1978): Handbook on mechanical properties of rocks, Vol. IV, Trans tech Publications, 515 p.
- Morgenstern, R., Friedel, M., Konietzky, H. (2024): Bericht zur Barriereintegrität für das Vorhaben Alertheimer Mulde, Institut Geotechnik, TU BAF, 05.08.2024
- Morgenstern, R., Konietzky, H. (2024): Bericht zum Flutungsszenario für das Vorhaben Altertheimer Mulde, Institut Geotechnik, TU BAF, 05.08.2024
- Rabat, A. et al. (2022): Influence of water content on the basic friction angle of porous limestones – experimental study using an automated titling table, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 81: 223
- Singh, B., Goel, R.K. (2012): Engineering rock mass classification, Elsevier, 356 p.