

Simulation of Pressure- and Time-Dependent Behavior of Backfill Material in Numerical Calculations

The influence of underground openings due to mining activities on ground subsidence and sinkholes can be minimized by the use of backfill material. Mechanical properties of the backfill material, e.g. material stiffness, are depending on the pressure, and

if binders are used, are also developing with time. Numerical simulations are an efficient tool to help estimating the influence of the backfill material on the deformation behavior and the stress distribution.

Simulation des druck- und zeitabhängigen Verhaltens von Versatzmaterial bei numerischen Berechnungen

Durch den Versatz von untertägigen Hohlräumen des Gewinnungsbergbaus, wie z. B. Strecken und Kammern, können die Einflüsse auf die Tagesoberfläche, wie Bergsenkungen oder Tagesbrüche, vermindert werden. Die Steifigkeit des Versatzes entwickelt sich druckabhängig bzw. bei der Verwendung von Bindemitteln

auch zeitabhängig. Um den Einfluss des Versatzes auf das Verformungsverhalten und die Gebirgsdruckverteilung abzuschätzen, steht mit dem Einsatz von numerischen Simulationen ein effizientes Werkzeug zur Verfügung.

1 Introduction

Over the years, the requirements for economic and sustainable mining have increased. In order to meet these requirements, mining technologies and the use of residues have to be optimized. As a result of the underground excavations, the primary stress state, which is essentially dependent on depth, geology and tectonics, is disturbed and stress re-distributions lead to deformations.

These deformations can reach the ground surface, resulting in ground subsidence or even sinkholes (Figure 1). The mining induced influence on the surface of the day can be reduced by backfilling the underground openings (1). In some cases, the type



Fig. 1. Sinkhole near Berezniki in Perm region, Russia (2).
Bild 1. Tagesbruch bei Berezniki in der Perm Region, Russland (2).

1 Einleitung

Im Lauf der Zeit sind die Anforderungen an einen wirtschaftlichen und nachhaltigen Bergbau gestiegen. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, müssen Abbauverfahren und die Nutzung von Rückständen optimiert werden.

Durch die Auffahrung von untertägigen Hohlräumen wird der Primärspannungszustand, der im Wesentlichen von der Teufe und Tektonik abhängig ist, gestört und es kommt zu Spannungsumlagerungen, die Verformungen des Gebirges nach sich ziehen. Im ungünstigen Fall erreichen diese Verformungen die Tagesoberfläche und es kommt zu Bergsenkungen oder Tagesbrüchen (Bild 1). Durch den Versatz von Strecken und Kammern können die Einflüsse auf die Tagesoberfläche vermindert werden (1).

Im Idealfall können die Art des Versatzes und das Versatzmaterial nach den örtlichen Gegebenheiten und den Anforderungen unter Tage ausgewählt werden. Die Steifigkeit des Versatzes wird durch Versatzkennlinien beschrieben, sodass auf dieser Basis der Einfluss des Versatzes auf das Verformungsverhalten und die Gebirgsdruckverteilung abgeschätzt werden kann. Hierfür steht mit dem Einsatz von numerischen Simulationen ein effizientes Werkzeug zur Verfügung.

2 Bedeutung des Versatzes im Kammer-Pfeiler-Bau

Im Folgenden wird der Einfluss des Versatzes auf das Gebirgsverformungsverhalten am Beispiel eines Kammer-Pfeiler-Baus

of backfill technology and the backfill material can be selected according to the local prerequisites and demands. The stiffness of the backfill material is described by reaction curves, based on which the influence of the backfill on the deformation behavior and stress distribution can be estimated on this basis. For this, numerical simulations are an effective tool.

2 Advantage of backfill in room-pillar-mining

In the following, the influence of the backfill on the deformation behavior of a room-and-pillar mine for a potassium seam is described. Special attention is given to an as complete as possible extraction of the potassium seam and the use of residue material as backfill, so that the surface dump areas can be reduced.

With the room-and-pillar mining with backfill of the excavated chambers (Figure 1) it can be possible to almost completely excavate deposits with intermediate seam thickness with only minor mining losses. In this case, the chambers between the regularly arranged pillars are initially mined. The pillars are dimensioned in a way that they can carry the rock pressure. Subsequently, the chambers are backfilled with hardening material. After reaching a sufficiently high strength, the pillars between the backfilled chambers are removed. Finally, the resulting excavations can be left open or be backfilled (3).

The room- and pillar dimensions must be chosen in such a way that the mining safety is guaranteed and the mining equipment can be used effectively. This results in a high utilization of the drilling, loading and conveying equipment. In addition, a simultaneous mining of several chambers via a conveyor line is possible and the mining losses are minimized. On the other hand, there is more time needed until a sufficient backfill strength and stability is reached for further mining of the pillars. In addition, auxiliary ventilation may be needed.

In potash mining, a huge amount of residual salts is produced during processing, which has to be stored in surface dumps. Due to

für ein Kaliflöz beschrieben. Das besondere Augenmerk liegt auf dem möglichst vollständigen Abbau des Flözes und der Nutzung von Rückstandsmaterialien als Versatz, sodass die übertägigen Haldenflächen reduziert werden können.

Mit dem Kammer-Pfeiler-Bau mit Versatz (Bild 2) kann ein nahezu vollständiger Abbau von Lagerstätten mit lediglich geringen Abbauverlusten bei mittleren Mächtigkeiten realisiert werden. Hierbei werden zunächst die Kammern zwischen den regelmäßig angeordneten Pfeilern aufgefahren. Die Pfeiler sind so dimensioniert, dass sie den Gebirgsdruck aushalten können. Anschließend werden die Kammern mit Versatz verfüllt, der eine gewisse Festigkeit entwickelt. Nach Erreichen einer ausreichend hohen Festigkeit werden die Pfeiler zwischen den versetzten Kammern abgebaut. Abschließend kann der entstandene Abbauraum offen stehen bleiben oder ebenfalls versetzt werden (3).

Die Kammer-Pfeiler-Abmessungen sind so zu wählen, dass die Sicherheit gewährleistet ist und die Abbausrüstung effektiv eingesetzt werden kann. Dadurch wird eine hohe Auslastung der Bohr-, Lade- und Fördergeräte erreicht. Außerdem ist der gleichzeitige Abbau von mehreren Kammern über eine Förderstrecke möglich und die Abbauverluste werden minimiert. Demgegenüber stehen längere Wartezeiten bis eine ausreichende Versatzfestigkeit zum Abbau der Pfeiler erreicht ist. Zudem ist oftmals eine Sonderbewetterung notwendig.

Im Bereich des Kalibergbaus fallen bei der Aufbereitung große Mengen an Rückstandssalzen an, die in Halden an der Oberfläche deponiert werden. Durch die Pfeiler wird ein signifikanter Teil der Lagerstättenvorräte nicht abgebaut (4). Aufgrund des hohen Ausnutzungsgrads der Pfeiler und der fehlenden Stützwirkung von nicht versetzten Kammern, kann es zu Kriechbrüchen in den Pfeilern und zum Versagen der Firste in den Kammern kommen. Damit besteht an der Tagesoberfläche langfristig die Gefahr von Bergschäden.

Im Idealfall können die Rückstandssalze so aufbereitet und mit Bindemittel versehen werden, dass sie ein geeignetes Versatzmaterial darstellen. Hierdurch wird der Aufwand für die Deponierung reduziert und durch die versetzten Kammern ist der Abbau der Pfeiler möglich. Wenn sogar das gesamte Bau- feld versetzt wird, kann das Risiko von Bergschäden gemindert werden.

Für einen verfestigenden Versatz im Kalibergbau kann auf Rückstandssalze der Aufbereitungsprozesse zurückgegriffen werden (5), die zum größten Teil aus NaCl bestehen und Beimengungen von KCl, MgCl₂ oder CaSO₄ enthalten können. Als Bindemittel wird im Regelfall Zement verwendet. Durch das Abbindeverhalten des Zements ergibt sich neben der druckabhängigen Steifigkeitsentwicklung zusätzlich eine Zeitabhängigkeit für Steifigkeit und Festigkeit des Versatzmaterials.

Das Materialverhalten wird durch einaxiale Druckversuche und Ödometerversuche bestimmt. Die erforderliche Zugabemenge des Zements ergibt sich aus den Anforderungen an die Druckfestigkeit und die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung. Hieran ist insbesondere der Betriebsablauf anzupassen und die zusätzliche Erwärmung der Abwetter durch den Hydratationsprozess ist ebenfalls zu berücksichtigen. Das Verfahren zum Einbringen des Versatzes ergibt sich aus den

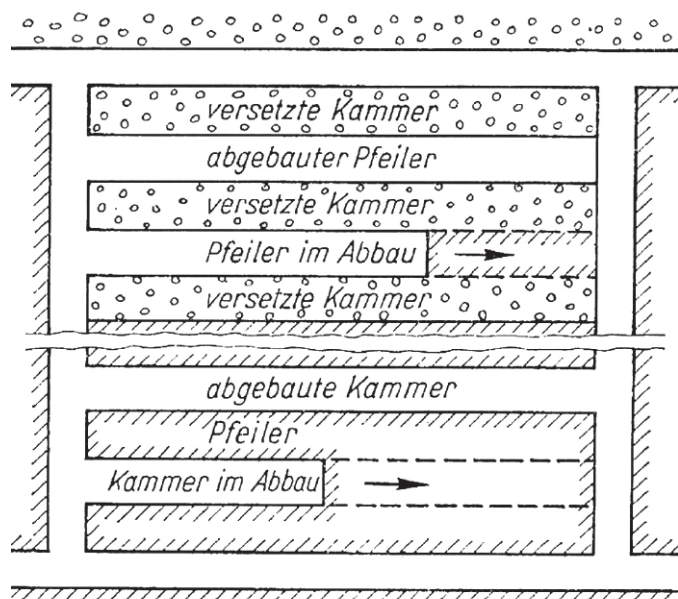


Fig. 2. Room-pillar-mining with removal of the pillars after backfill of the rooms (3).

Bild 2. Kammer-Pfeiler-Bau mit Abbau der Pfeiler nach Versatz der Kammern (3).

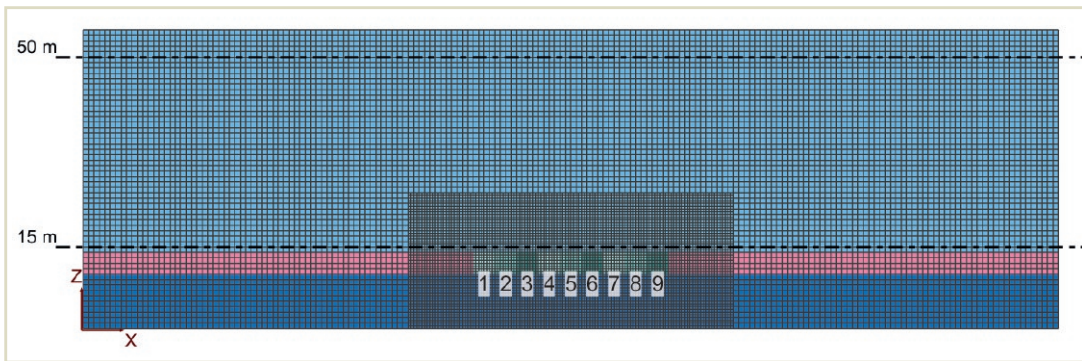


Fig. 3. Numerical model with location of the evaluation profiles and designation of the rooms.
 Bild 3. Numerisches Modell mit Lage der Auswerteprofile und Bezeichnung der Kammern.
 Source/Quelle: Itasca

the remaining pillars, a significant part of the deposits cannot be excavated (4). Due to the high degree of strength utilization of the pillars and the lack of support effects of not backfilled rooms, creep fractures inside the pillars and failure of the roof in the rooms can occur, i. e. there is a long-term risk of surface subsidence.

Ideally, the residual salts can be processed and mixed with binders in a way, that they can be used as backfill material. This would not only reduce the landfill costs, but would also allow to mine the pillars after backfilling the chambers. In addition, the risk of surface subsidence can be lowered.

In potash mining residual salts from the processing can be used to produce hardening backfill material (5). The residual salt mostly consists of NaCl and can contain KCl, MgCl₂ or CaSO₄. Cement is generally used as binder. Due to binding behavior of the cement, the backfill strength and stiffness develops not only pressure-dependent, but also has a time dependency.

The material behavior is determined by uniaxial pressure and oedometer tests. The amount of cement needed depends on the requirements on the compressive strength and the time period over which the backfill strength develops. In particular, the mining sequence has to be adapted to the backfill properties, and also the additional heating of the venting system due to the hydration heat has to be taken into account. The installation method for the backfill arises from the grain sizes distribution of the residual salt. In the case of coarse-grained material, tipping backfill, pneumatic and slinger stowing can be used, while fine-grained material is placed as hydraulic backfill. Technically, by these methods the chamber can be backfilled of up to 90%.

3 Numerical simulation of room-pillar-mining

3.1 Boundary conditions, material parameters and states of mining

By using numerical simulations with a generic model of a room-and-pillar mine, the rock behavior will be analyzed. The software FLAC3D (6) of Itasca Consultants GmbH, Gelsenkirchen/Germany, is used for the simulation. FLAC3D is a continuum code based on the explicit finite-difference method.

Figure 3 shows the 2,5D numerical model, with a width of 180 m, a height of 55 m, which consists of 14,400 zones. At the top model boundary, a stress boundary with a vertical load of 29 MPa is applied, which corresponds to the overburden load. For the other model boundaries displacement boundary conditions are used with fixed normal displacements. The chambers 1 to 9 have a width and height of 4 m each. The geology consists, from floor to roof, of rock salt (dark blue), potassium salt (magenta) and rock salt (blue).

im Rückstandssalz enthaltenen Korngrößen. Bei grobkörnigem Material kommen Sturz-, Blas- und Schleuderversatz infrage, während feinkörniges Material als Spülversatz eingebracht wird. Technisch möglich ist mit diesen Verfahren ein Verfüllungsgrad von bis zu 90%.

3 Numerische Simulation eines Kammer-Pfeiler-Baus

3.1 Randbedingungen, Materialparameter und Abbauzustände

Mit einem numerischen Modell für einen generischen Kammer-Pfeiler-Bau soll im Folgenden das Gebirgsverhalten untersucht werden. Zur Simulation wird das Programm FLAC3D der Itasca Consultants GmbH, Gelsenkirchen, verwendet. Es handelt sich hierbei um ein Programm auf Basis der expliziten Finiten Differenzen Methode für die Kontinuumsmechanik (6).

Bild 3 zeigt das verwendete numerische Modell mit einer Breite von 180 m und einer Höhe von 55 m. Der Koordinatenursprung liegt in der linken unteren Modellecke. Insgesamt besteht das quasi 2D-Modell aus 14.400 Zonen. Am oberen Modellrand wirkt eine teufenabhängige Spannungsrandbedingung mit 29 MPa. Die weiteren Ränder sind über Verschiebungsrandbedingungen gehalten, sodass sich in y-Richtung ein ebener Verzerrungszustand einstellt. Die aufzufahrenden Kammern 1 bis 9 haben eine Abmessung von je 4 m in Breite und Höhe. Die Geologie besteht vom Liegenden ins Hangende aus Steinsalz (Dunkelblau), Kalisalz (Magenta) und Steinsalz (Blau).

Ausgewertet wird bei 15 m und 50 m Modellhöhe das Profil der Vertikalverschiebungen. Diese Profile liegen damit 1 m bzw. 36 m oberhalb der Firste der Abbaukammern. Zudem werden auch die von-Mises-Vergleichsspannungen als Konturplot zur Bewertung herangezogen.

Bild 4 zeigt den simulierten Bauablauf. Die Auffahrung für den Bereich wird in drei Phasen (I, II, III) unterteilt. In Phase I werden die Kammern 1, 4 und 7 aufgefahren und verfüllt. Nach dem Abbindezeitraum von 60 Tagen beginnt mit der Auffahrung der Kammern 2, 5 und 8 die Phase II. Abschließend werden ab Tag 141 mit der Phase III die Kammern 3, 6 und 9 aufgefahren.

Jede Kammer wird in zehn Arbeitstagen abgebaut und wieder verfüllt. Der Auffahrungsbeginn ist jeweils um einen Tag versetzt. Darauf folgt der Abbindezeitraum des zementgebundenen Versatzmaterials von 60 Tagen. Durch diese Auffahrreihenfolge steht immer ein Pfeiler von 8 m Breite zwischen zwei sich im Abbau befindenden Kammern. Die Simulation wird über etwa zehn Jahre fortgeführt, um eine Aussage zum langfristigen Setzungsverhalten treffen zu können.

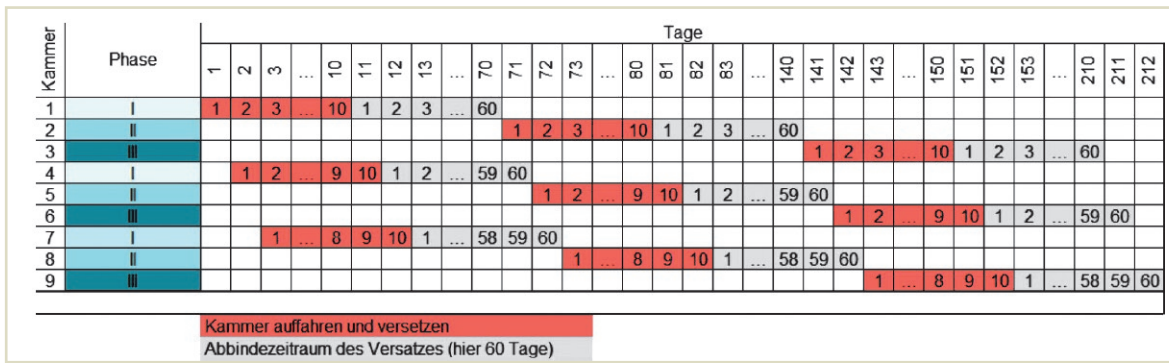


Fig.4. Time schedule of the mining of nine rooms in the potash seam.
 Bild 4. Zeitlicher Ablauf des Abbaus von neun Kammern im Kaliflöz.
 Source/Quelle: Itasca

The profile of the vertical displacements is evaluated at 1 m and 36 m above the roof of the chambers. In addition, the von-Mises stresses are also used for an assessment.

Figure 4 shows the mining process as it was simulated. The mining is divided into three phases (I, II, III). In phase I, the chambers 1, 4 and 7, in phase II chambers 2, 5 and 8 and in phase III chambers 3, 6 and 9 are excavated and backfilled. Between phases I, II and III are the binding periods of 60 days each, so that phase I starts at day 0, phase II at day 61 and phase III at day 141.

Each chamber is mined and backfilled within ten working days. The start of the mining is offset by one day, followed by the binding period of the cement of 60 days. Due to this approach, there is always a 8 m wide pillar between two open chambers. After the mining process has been completed, the numerical simulation was continued for a real time period of about 10 years, in order to analyze the long-term behavior.

The constitutive model for the salt and potash considers a linear-elastic stress-strain relationship and stationary creep (Norton power law) (7). The secondary and tertiary (damage induced) creep behavior is not considered. The material parameter used for the numerical simulation are summarized in table 1.

For the backfill material, the standard elastic constitutive model in FLAC3D (8) was modified in such a way, that the Young's

Das Stoffmodell für das Salinar berücksichtigt eine linear-elastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung sowie das stationäre Kriechen. Das Kriechen wird mit einem einfachen Potenzansatz nach Norton simuliert (7). Dieser Ansatz ermöglicht die Beschreibung des dominierenden Kriechverhaltens. Transiente oder schädigungsinduzierte Kriechanteile werden jedoch nicht berücksichtigt. Der Strukturparameter kann in Verbindung mit der Arrhenius-Gleichung auch den geothermischen Gradienten berücksichtigen. In diesem Fall wird von einer einheitlichen Gebirgstemperatur ausgegangen. Die für die Geologie verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Für den Versatz wurde ein elastisches Stoffmodell in FLAC3D implementiert (8), in dem der Elastizitätsmodul für unterschiedliche Drücke und Zeitpunkte in Tabellen vorgegeben wird. Damit ist eine einfache und flexible Möglichkeit gegeben, das Steifigkeitsverhalten des Versatzmaterials in der Simulation an Versuchsergebnisse anzupassen. Die Zeit ab Einbau wird im Stoffmodell als interne Variable mitgeführt. Als Druck wird die Mittelspannung berücksichtigt, wenn sie bei mechanischen Vorzeichenkonventionen kleiner 0 ist. Der wirksame Elastizitätsmodul wird aus den beiden Tabellen interpoliert. Die in Tabelle 2 dargestellten Versatzkennwerte lehnen sich an die Untersuchungen von Helms (9) und Wotyakov (10) an.

Description / Beschreibung	Seam thickness / Mächtigkeit [m]	Density / Dichte [kg/m ³]	Poisson's ratio Poissonzahl [-]	Young's modulus E-Modul [MPa]	Strukturparameter / Strukturparameter [1/s]	Spannungs- exponent [-]
Rock salt in the roof / Steinsalz im Hangenden	41	2150	0.24	21300	1.6E-15	5.3
Potash seam / Kaliflöz	4	2000	0.20	19200	9.3E-15	5.8
Rock salt in the floor / Steinsalz im Liegenden	10	2150	0.25	18900	9.3E-14	3.7

Table 1. Material parameter of the geology.
Tabelle 1. Materialparameter für die Geologie. Source/Quelle: Itasca

modulus is defined for different pressures and different times in form of tables. This provides a simple and flexible way of adapting the numerical stiffness behavior of the backfill material to experimental results. The effective Young's modulus is interpolated from the corresponding two table entries. The backfill properties as shown in table 2 are based on the investigations of Helms (9) and Wotyakov (10).

3.2 Calculation results

The settlement behavior as a function of time above the mining is of particular importance for the assessment of the subsidence risk in the mining area. In Figure 5 the profiles of the vertical displacements (1 m and 36 m above the seam) are shown after beginning of the mining phases I, II and III, and in addition 1 and 10 years after the beginning of the mining operations. As expected, the deformations continue to increase with each new excavation. However, the deformation increment between phases II and III is

Description / Beschreibung	Density / Dichte [kg/m ³]	Poisson's ratio / Poissonzahl [-]	Pressure / Druck [MPa]	Young's modulus / E-Modul [MPa]	Time / Zeit [d]	Young's modulus / E-Modul [MPa]
Backfill material consisting of residual salt and binder / Versatz aus Rückstands- salzen und Bindemittel	2000	0.23	0.0	25	0	75
			0.6	50	30	150
			1.2	75	90	300
			2.5	100	3600	300
			5.0	125		
			10.0	150		
			20.0	250		
			40.0	600		
80.0	1200					

Table 2. Material parameter of the backfill (9,10).
Tabelle 2. Materialparameter für den Versatz (9,10).

3.2 Berechnungsergebnisse

Das Zeit-Setzungsverhalten oberhalb der Abbaue ist für die Bewertung möglicher Bergschäden von besonderer Bedeutung. Bild 5 zeigt die Profile der Verschiebungen in z-Richtung für 1 m und 36 m oberhalb des Flözes jeweils nach Versatz der Phasen I, II und III sowie 360 und 3.600 Tage nach Beginn der Auffahrung. Erwartungsgemäß nehmen die Verformungen mit jeder Neuauffahrung weiter zu. Allerdings ist das Verformungsinkrement zwischen Phase II und III geringer als zwischen Phase I und II. Wenn die Kammern in Phase III aufgefahren werden, erreicht der Versatz aus Phase I bereits eine größere Stützwirkung. Dies lässt sich auf die zeitliche und druckabhängige Steifigkeitszunahmen des Versatzes der Kammern aus Phase I zurückführen (Bild 5, links).

In der langfristigen Betrachtung wird deutlich, dass zwischen Ende der Phase III und zum Zeitpunkt nach 360 Tagen ein größerer Verformungsanteil zur Setzung hinzukommt. Dies ist ebenfalls mit der zeitlichen und druckspezifischen Entwicklung der

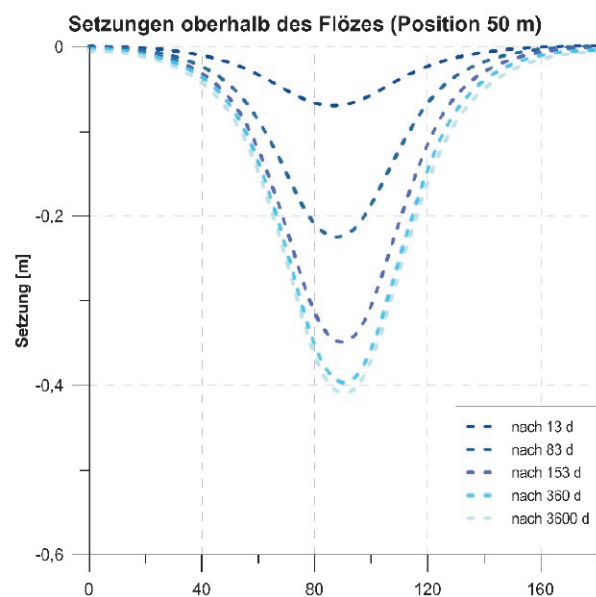
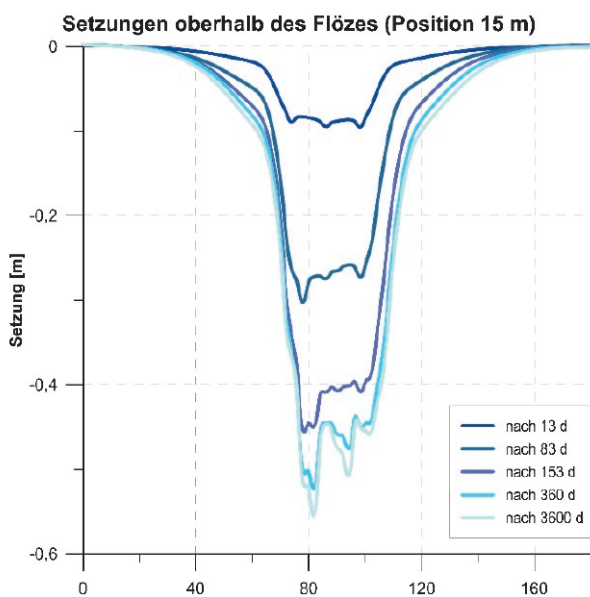


Fig. 5. Vertical displacements 1 m and 36 m above the chamber roof.
Bild 5. Verschiebung in z-Richtung 1 m und 36 m oberhalb der Kammerfirste. Source/Quelle: Itasca

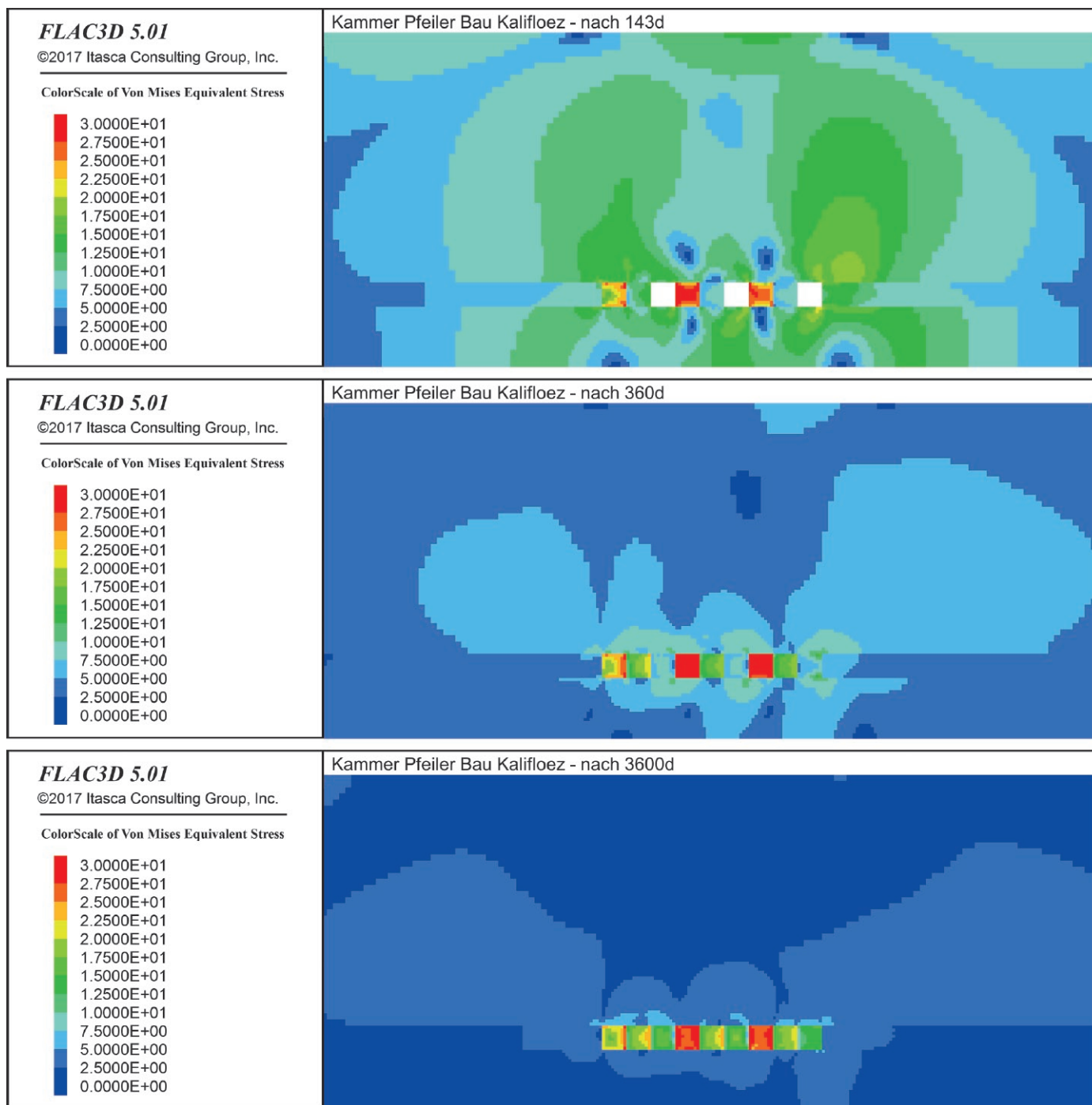


Fig. 6. Contour plot of equivalent stress in MPa for 143, 360 and 3,600 day (limited to 30 MPa).

Bild 6. Konturplots der Vergleichsspannung in MPa für die Zeitpunkte 143, 360 und 3.600 Tage (auf 30 MPa begrenzt). Source/Quelle: Itasca

lower than that one between phases I and II. When the chamber in phase III is mined, the backfill of phase I already shows a greater supporting impact, due to the time- and pressure-dependent stiffness increase (Figure 5, left).

In the long-term view, it can be seen that larger deformations accumulate 360 days after the end of phase III. This can also be explained by the time- and pressure-specific development of the stiffness of the backfill material of phase II and in particular of phase III. After 10 years, no significant additional displacements are developing, so that a maximum settlement of 0.4 m with a settlement crater of approximately 140 m occur 36 m above the mining level (Figure 5, right).

Steifigkeit des Versatzes von Phase II und insbesondere Phase III zu erklären. Zum Zeitpunkt 3.600 Tage sind keine wesentlichen zusätzlichen Verschiebungsbeträge mehr zu erwarten, sodass sich 36 m oberhalb der Abbaue eine maximale Setzung von 0,4 m mit einer Setzungsstrichterbreite von etwa 140 m einstellt (Bild 5, rechts).

Bild 6 zeigt die Vergleichsspannung zu den Zeitpunkten 143, 360 und 3.600 Tage. Der Zeitpunkt 143 Tage entspricht der Auf-fahrung der Kammern 3, 6 und 9 in Phase III. Deutlich wird, dass die aus Versatzmaterial bestehenden Pfeiler in den ehemaligen Kammern 4 und 7 aufgrund der Gebirgsdruckumlagerung große Spannungen aufnehmen müssen. Hierfür ist durch eine geeigne-

Figure 6 shows the von-Mises stress at 143, 360 and 3,600 days. Day 143 corresponds to the excavation of chambers 3, 6 and 9 in phase III. It becomes obvious that the pillars, which consist of the backfill material in the former chambers 4 and 7 have to absorb large stresses due to the stress re-distribution. This has to be taken into account when the required backfill behavior is defined, to ensure the stability of the pillars and to guarantee the operational safety.

After backfilling the final chambers, the deviatoric stresses in the surrounding rock decrease rapidly. One year after the end of the mining operations, larger creep deformations are only taking place in the immediate neighborhood of the backfilled regions. Ten years after the end of the mining operations, the isotropic stress state is restored. A failure of the backfill material will not take place anymore due to the complete fixation in phase III.

4 Conclusions

The methods introduced by Roschlau and Heintze (3) together with the selection of an appropriate backfill material provide the mean to minimize mining losses and to maximize the use of residual salts, which leads to a reduced need for dump areas. For this, a corresponding infrastructure must be in place, and the operation procedures must be adjusted.

Using the results of the numerical calculations, the setting behavior can be analyzed, by which an assessment of the effectiveness of the backfill material with regards to a subsidence risk can be made. In addition, critical areas inside the backfill can be identified. Based on the calculated stresses in the backfill material, requirements on the backfill strength properties can be defined. Additional numerical calculations can be used to optimize the mining operation. The effect of different filling degrees or different backfill properties can also be investigated. The extension of the constitutive model including plastic behavior, e.g. the Drucker-Prager-failure criterion, is possible.

References / Quellenverzeichnis

(1) Kratzsch, H.: Bergschadenkunde. Springer-Verlag, Berlin, 1974.
 (2) ITAR-TASS/Presse-Service des Gouverneurs der Region Perm (<http://perm.ru>): Das Versagen des Bodens im Südwesten von Berezniki. (<http://tass.ru/proisshestviya/2056154>) Stand 19.06.2015. Download am 07.02.2017.
 (3) Roschlau, H.; Heintze, W.: Bergbautechnologie (Lehrbuch). Erzbergbau Kalibergbau. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1980.
 (4) Khayrutdinov M. M.; Karasev G. A.: Formirovanie raznoprochnich zakladochnykh massivov pri razrabotke mestorojdeniy poleznykh iskopaemykh. Gorno-informazionniy analiticheskiy biluyten (GIAB), 2008.
 (5) Wotyakov M. V.; Khayrutdinov M. M.: Vozmojnost primeneniya sistem s tverdeyushey zakladkoy pri razrabotke kaliynych mestorojdeniy. Gorno-informazionniy analiticheskiy biluyten (GIAB), 2007.
 (6) Itasca Consulting Group, Inc.: FLAC3D Theory and Background. Minneapolis, 2013.

te Wahl des Versatzes sicherzustellen, dass die Pfeiler nicht brechen und somit die Arbeitssicherheit gefährden.

Nach Verfüllung der letzten Kammern geht die deviatorische Beanspruchung des umgebenden Salzgebirges rasch zurück. Bereits nach 360 Tagen sind nur noch im unmittelbaren Umfeld des Versatzes größere Kriechverformungen zu erwarten. Nach 3.600 Tagen herrscht fast im gesamten simulierten Salinar wieder ein isotroper Spannungszustand. Ein Versagen des Versatzes ist aufgrund der vollständigen Einspannung nach der Verfüllung in Phase III nicht mehr zu erwarten.

4 Schlussfolgerungen

Mit den von Roschlau und Heintze (3) vorgestellten Verfahren und einer geeigneten Wahl des Versatzes können Abbauverluste minimiert und Rückstandssalze weiterverwendet werden. Dadurch verringern sich auch die benötigten Haldenflächen. Jedoch müssen hierfür eine entsprechende Infrastruktur vorgehalten und die Betriebsabläufe entsprechend angepasst werden.

Mit den numerischen Berechnungen kann eine Abschätzung zum Setzungsverhalten getroffen werden, um die Wirksamkeit des Versatzes auch bezüglich Bergschäden zu beurteilen. Zudem können im Versatz kritische Bereiche identifiziert werden. Anhand der berechneten Spannungen im Versatz lassen sich Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften stellen. Durch weitere numerische Berechnungen können Optimierungen zu den Auffahrungszeitpunkten und zur Auffahrungsreihenfolge ermittelt werden. Im Weiteren können Untersuchungen mit verschiedenen Verfüllungsgraden oder anderen Steifigkeitseigenschaften durchgeführt werden. Eine Weiterentwicklung des Stoffmodells für den Versatz zur Berücksichtigung von Festigkeitseigenschaften, z.B. mit der Bruchbedingung von Drucker-Prager, ist denkbar.

(7) Itasca Consulting Group, Inc.: FLAC3D Creep Material Models. Minneapolis, 2013.
 (8) Itasca Consulting Group, Inc.: FLAC3D Constitutive Models. Minneapolis, 2013.
 (9) Helms, W.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über den Einsatz bindemittelverfestigten Versatzes im Steinkohlenbergbau. Dissertation. Technische Universität Clausthal, 1982.
 (10) Wotyakov, M.: Povyschenie polnoty izvlecheniya zapasov kaliynych rud na osnove zakladki vyrabotannogo prostranstva galitovykh othodov. Dissertation. Moskauer Staatliche Bergbauuniversität, 2009.

Authors / Autoren

Ivan Akinshin, M.Eng., Dipl.-Ing. Christian Missal, Dr. Lothar te Kamp, Itasca Consultants GmbH, Gelsenkirchen