



Stabilitätsanalyse des sekundären Spannungszustandes in der Umgebung von Stollen mit einem physikalischen Modell

Juraj B. Ďurove¹ und Michal Maras¹

Analýza stability dlhých banských diel pomocou fyzikálneho modelovania

Článok sa zaoberá problematikou stability dlhých banských diel, ktorá je významná aj v špecifických prípadoch líniových podzemných stavieb razených v málopevných horninách. Výskum zmien napäťovo-deformačného stavu týchto diel bol realizovaný pomocou experimentov na modeloch z ekvivalentných materiálov. Uvedené výsledky pokusov umožňujú stanoviť hodnotu reakcie výstuže q potrebnú pre stabilizáciu podzemného diela razeného v pružno-plastickom horninovom prostredí.

Key words: stability of mine openings, physical modelling.

Einleitung

In Regionen denen Lagerstätten von Mineralrohstoffen existieren, muss besonders der Bewertung möglicher Konflikte zwischen Förderung, weitiger Nutzung des Gebietes (z.B. Urbanisierung) und den Interessen des Umweltschutzes grosse Beachtung gewidmet werden. Eine grosse Störung des natürlicher Gleichgewicht des Reliefs verursacht Senkungen der Oberfläche und die Destruktion von Bauwerken u.a.

Die Bedeutung der Modellwissenschaft zur Lösung von Stabilitätsprobleme ist lange erkannt und nimmt auch entsprechend steig und rasch zu (Golser et al. 1997; Bukovanský 3/1998). Der moderne Geotechnik und Bergbau z.B. erfordert ein komplexes Ineinandergreifen vieler Aufgabengebiete (Maras und Vavrek, 1997) und Interdisziplinäres Wissen um Bergbau-Umwelt-Geo-System.

Begriffe: Umwelt, Geotechnik, Berg- und Tunnelbau und physikalische Ähnlichkeit

Unter der Begriff Umwelt verstehen wir die Gesamtheit aller abiotischen und biotischen Faktoren, welche eine Lebensinheit (Organismus, Population, Biogeozönose) beeinflussen. Ingesamt erscheint die Umwelt als ein unendliches System, das sowohl gewöhnliche Erscheinungen (z.B. Regen, Wind) als auch Kräfte des Weltalls (z.B. kosmische Strahlung) umfasst (Grosse et al., 1995).

Die Geotechnik ist als die Wissenschaft vom stabilen Bauen in und mit der Erde. Durch die Gründung der Geotechnischen Kommission Schwedens im Jahre 1910 tritt sie erstmalig als Spezialwirtschaft zur Sicherung unstabiler Untergrundes praktisch in Erscheinung.

Bei dem Betrieb von Bergwerken und ihrer Teilprozesse (Gewinnung, Stabilität des Bauwerks, u.a.) in technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Hinsicht ist die Beherrschung der durch den Bergbau entstehenden Umweltbeeinflussungen von grösster Bedeutung. Die Forderung nach einer Minimierung der Umweltbeeinflussungen steht heute als drittes Leitprinzip neben dem Verlangen nach Sicherheit und wirtschaftlichen Nutzen von Bergwerken (Fettweis und Lechner in Sturm, 1990).

Problemstellung im Bergbau und Tunnelbau infolge der Gleichartigkeit der Voraussetzungen für die Untersuchung des Untergrundes zusammen behandelt. Physikalische Ähnlichkeit liegt vor, wenn alle am physikalischen Prozess beteiligten Grössen wie Wege, Zeiten, Kräfte, Spannungen, Geschwindigkeiten, Drücke, Arbeiten usw. entsprechend den physikalischen Gesetzen ähnlich übertragen werden. Dies ist jedoch im allgemeinen nicht möglich. Daraus folgt, dass nur eine beschränkte Anzahl physikalischer Grundgleichungen ähnlich übertragbar ist, d.h. nur unvollkommene Ähnlichkeit ist in der Regel realisierbar.

Neuzeitliche Situation und Problemstellung

Aus der verschiedenen Gesteine sind folgende drei Typen für die Beurteilung und Behandlung des Baugrundes der Tunnel- und Stollenanlage als allseitig räumliches Problem von Bedeutung:

- die festen Felsgesteine,
- die veränderlichfesten Felsgesteine und Lockergesteine.

Die letzte Gesteine sind vor allem vor dem Zutritt von Wasser zu schützen. Die durchlaufen vom festen über den halbfesten, den plastischen zum breiigen und schliesslich flüssigen Bereich, ehe sie den

¹ Ing. B. Ďurove, CSc. und Ing. Michal Maras, CSc., Lehrstuhl für Bergbau und Geotechnik, Fakultät BERG der TU Košice, Park Komenský 19, 043 84 Košice, Slowakei
(Rezension: Prof. Ing. Félix. Sekula, DrSc. und Ing. Anton. Hučko, CSc.)

Zusammenhang untereinander lösen. Wasser bedeutet Gewichts- und damit Druckerhöhung, ferner Gefügeveränderung. Die Anlage von Tunneln und Stollen verlangt in diesen Lockergesteinen erheblich grösseren technischen Aufwand an Sicherung und Stabilisierung, und auch die Anwendung besonderer Vortriebsmethoden die bei festen Gesteinen nicht in Frage kommen.

Nach Brandl (in Golser et al., 1997) ist die wirksame Scherfestigkeit von Böden und zerlegtem, verwittertem Fels hängt von mehreren Faktoren ab und ist kein konstanter Parameter. Entwurf, Ausführung und Risikoanalysen von Tunneln sollten daher das postfailure Verhalten und die Restscherfestigkeit, somit auch die Tendenz zu progressiver Bruchbildung im Untergrund, berücksichtigen. Die Veröffentlichung fasst relevante Einflussfaktoren auf diese Untergrundeigenschaften zusammen und gibt Hinweise zu geeigneten Versuchsmethoden (Atze et al., 1997).

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Untersuchung des Einflusses der Reaktion des Ausbaues q auf die Stabilisierung des Bergwerks (im Streckenhohlraum und auch in der Umgebung der Messstrecken), durch physikalische Modellierung der Basisstrecke von der Handlova-Nováky Grube (Slowakei).

In der ersten Etappe der Forschung hat es den Einfluss der Veränderungen des physikalischen Zustand eines tonartigen Gesteins auf die Verlaufsveränderungen der Deformationscharakteristik des Massivs, von der die Belastung des Grubenausbaus der Bergwerke direkt abhängt, geprüft.

Beim Vortrieb in Bergwerken begegnen uns in realen Bedingungen meistens solche Fälle, in denen unter Einfluss hoher Spannungskonzentrationen in deren Umfeld nichtlineare Deformationen auftreten, falls sich der Charakter der Gesteinsbrüchigkeit entweder zu ideal plastischen, oder zu ideal spröden Bruchdefekten nähert (ein spröder Bruchdefekt liegt im Intervall von 0 bis ∞).

Theoretische Analyse des Verlaufs

Hatala (1984) geht in der analytischen Lösung aus der Gleichgewichtsgleichung und den Bedingungen eines Grenzzustands für die Entstehung einer Teilbrüchigkeit des Gesteins mit den Parametern ϕ^+ und σ_u^+ aus. Wenn auch diese Lösung ermöglicht, wie der Autor angibt, den Wert der benötigten Ausbaureaktion q für die Stabilisierung des elastischen Bereichs mit einem Halbmesser R , wie auch weitere wichtige Werte zu erhalten, müssen wir dennoch die errechneten Werte kritisch betrachten. Das allgemein am meisten diskutierte Problem der mathematischen Modellierung ist, in welche Masse das Modell die Charakteristik und das Verhalten des realen Massivs erfasst. Konkret z.B. zieht es nicht den Spannungswechsel im unelastischen Bereich in Erwägung, zu dem es infolge eines Wandels des physischen Zustands des Gesteins kommt. Unter den Bedingungen der Lagerstätten in dem erwähnten Kohlenbecken hat die Änderung des Winkels der inneren Reibung einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung des Verlaufs der Deformationscharakteristik des Massivs (ϕ wechseln zu ϕ^+). Diese Schlussfolgerung wurde im Verlauf der bisherigen Exploitation Handlova-Nováky Lagerstätten oft konstantiert und auch theoretisch begründet (Hučko, 1963; Machálek, 1980; Bukovanský, 1/1998). Der konkrete Wert der Grösse ϕ ist von der Eigenschaft des tonartigen Gesteins abhängig.

Darstellung der Hypothese

Aus dem Genannten geht hervor, dass die Wandlung der Humidität des tonartigen Gesteins, ausgedrückt auch durch die Wertänderungen des Winkels der inneren Reibung (ϕ wandelt sich zu ϕ^+), die Ursache der Schwängung der mechanischen Widerstandsfähigkeit des Gesteins ist. Bei der Abbildung des Grenzspannungszustands des Gesteins laut MOHR (Abb. 1) in der Umgebung von Bergwerken heisst das, dass die Umhüllende (1) durch den Einfluss des Festigkeitsverlustes des Gesteins in die Lage (2) gerät und unter dem Einfluss der Humiditätsänderung des Tons es zu ihrer Kippung (Lage 3).

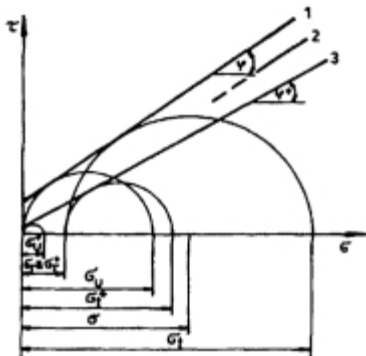


Abb.1. MOHR'schen Spannungskreise σ_r , σ_t - radial und tangential Spannung im "trockene" Gestein (+ bedeutet "nasse" Gestein); σ_u - "trockene" Gesteinestigkeit (+ bedeutet "nasse" Gesteinestigkeit).

Mit der Auswahl geeignetester Grenzbedingungen, die am besten die Übereinstimmung zwischen dem realen tatsächlich Material- Gestein und der mathematischen Aussage zum Ausdruck bringen, befassen sich Arbeiten vieler Autoren (Egger 1974, Fumagali 1973, u.a.). Sie sind sich darin einig, dass wir den Verlauf der sekundären Spannungen mit mathematisch präzise formulierten Lösungen nicht kennen und dass seine Definition auch in der nächsten Zukunft ziemlich schwierig sein wird. Diese Umstände führte uns zum Entschluss (Hypothese), die qualitativen Veränderungen des physikalischen Zustands des Gesteins, die nachfolgende Deformation des Bergwerkes und adäquat dazu die erforderliche Reaktion des Ausbaus mittels eines physikalischen Modells als Mittel, das für die Belastungs- und Deformationsbestimmung in komplizierten Systemen angewendet wird zu erforschen.

Experimentell Teil

Bei den Experimentalarbeiten sind wir von der Erkenntnis ausgegangen, dass gegenwärtig für die Nutzung der Ähnlichkeitstheorie, für das physische Modellieren, wie auch für das technische Experimentieren die grundlegende methodische Gebrauchsanleitung in der folgenden Verfahren liegt (Kožešnik, 1983; Sedlatý, 1992 u.a.):

- sofern für den Untersuchungsvorgang Bezugsgleichung bekannt sind oder wir sie konstruieren können, dann kann man die Ähnlichkeitstheorie zur Untersuchung auf Bestimmtheit der beigefügten Eindeutigkeitsbedingungen benutzen - wir sprechen über die Methode der Analyse der Bezugsgleichungen,
- sofern wir die mathematische Abhängigkeit zwischen den Grössen, welche den Untersuchungsvorgang charakterisieren nicht kennen, dann ist es möglich die Methodik der Dimensionsanalyse zu benutzen. Es ist aber notwendig die Ergebnisse experimentell, und zwar durch physikalisch Modellierung, ggf. durch technische Experimente zu beglaubigen,
- bei der Mehrheit der Erscheinungen, zugeordnet zur Sphäre der Gesteins- und Gebirgsmechanik, kennen wir entweder die Bezugsgleichungen nicht, oder sie sind uns bekannt, doch für ein sehr idealisiertes Milieu.

Aus dem geht hervor:

1. zur Beglaubigung der Hypothese, dass sich die Veränderung des Parameters φ einem bestimmten Teil des Bergwerks in einer Deformation des ganzen Umkreises des Werks, und also auch in einer diversen Ausbaubelastung äussert, können wir die Methodik der dimensional Analyse benutzen.
2. für das Nachahmen qualitativer Änderungen des physikalischen Zustands des Gesteins können wir ein physikalisches Modell benutzen.

Für den Bedarf der Untersuchungen dieser Hypothese haben wir die Modellösung in zwei separiert: die elastischen und die elasto-plastischen Modellen.

Zugleich muss man konstatieren, dass es ist in dem gewählten Zutritt zur Modelluntersuchung der Wirkung des Gesteinsmilieus auf die Ausbaubelastung auch die Analyse der partikularen Bezugsgleichungen für die Wahl relevanter Grösser, die dimensionale Analyse für einen rationellen Aufbau eines Modells (Experiment) und die Auswertung der Ergebnisse benutzen.

Elastische Lösungen detaillierte Đurove (1999) beschrieben.

Elasto-plastische Lösungen

Relevante Grössen, die bei Untersuchungen des Spannungs-deformationszustands in Punkten auf dem Umfeld des Bergwerks auftreten, gewinnen wir in diesem Fall aus Gleichungen, geltend für den unelastisch Bereich.

Eine dimensionslose Beschreibung der gewünschten Erscheinung auf dem Modell kann es einer ähnlichen Form erhalten:

$$\frac{q}{\sigma} = \psi_2 \frac{U_a}{a}, \frac{\sigma_u^+}{\sigma_u}, \frac{\varphi^+}{\varphi} \quad (1)$$

Die Funktion ψ_2 bestimmen wir experimentell auf einen modell, wobei die 2 angeführten Simplexe im Prozess des Anwachsens nicht konstant sind (sie hängen von der wirkenden Spannung, ggf. ihrer Lage ab) und wir ihrer Verlauf kennen.

Eine Identität der monovalenten Kriterien bei äquivalentem Modellieren zu gewinnen ist praktisch unmöglich. Dies war der Grund, warum wir uns bei dieser Lösungen für die Ähnlichkeitstheorie aus der Analogie der Erscheinungen Zerfall und Durchwässerung tonartigen Gesteins entschieden haben. Dadurch büsst es zwar eine perfekte äquivalente Analogie ein, doch es gewonnen eine unerlässliche Grundlage für das Studium der physikalischen Gesteinzustandsänderungen und somit auch die Grundlage für die Aufgabenlösungen der Stabilität von Bergwerken unter komplizierten und sich wandelnden Bedingungen. Die angeführte Methode ähnelt jenen Methoden des approximativen äquivalenten Modellierens.

Die realen Werte der Grubenausbaubelastung werden in dem gegeben Fall ähnlich bestimmt, d.h. entweder durch Analogietransformation, oder durch Berechnung unter Berücksichtigung der monovalenten Kriterialegleichungen.

Modellanlagen

Die Experimente (im Laboratorium der Geomechanik der Fakultät BERG, TU Košice) haben wir in einem Modellrahmen (Abb. 2 und 3) durchgeführt, dessen vordere und hintere Wand aus Plexiglas ($d = 1$ cm) besteht, was eine visuelle Beobachtung der ablaufen Prozesse ermöglichte.

In der Laboratoriumsuntersuchungsetappe der Suche nach passenden äquivalenten Mischungen für konkrete physikalische Modelle zeigte sich, dass eine Ähnlichkeit bei der Durchwässerung des Materials unter Belastung zu erzielen sehr kompliziert ist. Dieser Vorgang erforderte eine Serie von Experimenten auf einen sog. Intermodell (Abb. 4).

Nach den Erfahrungen mit dem sog. Intermodell hat es mit dem Bau des eigentlichen Modells im Massstab 1:30 begonnen, Abb. 3. Das Innere hat es mit einer Polyethylenfolie ausgebetet, die von der äusseren Seite mit einer dünnen Ölschicht zur Elimination der Schleifkontakt bedeckt wurde. Zugleich ermöglichte uns die Folie während des Modellbaus und auch während des ganzen Experiments die notwendige Feuchtigkeit des äquivalenten Materials zu erhalten (Abb. 2). In den so vorbereiteten Modellrahmen füllte und drückte es schrittweise die einzelnen Schichten ein, die wir aus pulverigen Ton und Balotine in Verhältnis 1:2 in einem speziellen Gefäss vorbereitet. Nachdem das Modell mit dem äquivalenten Material vollständig aufgefüllt und der Aufdruck auf 0.05 MPA eingestellt war, wurde das eigentliche Modell-Bergwerk ausgeschlagen.

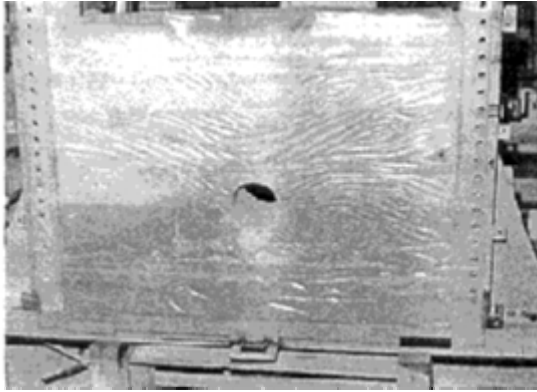


Abb.2. Modellrahmen (Modellbaukasten) für die Experimente.

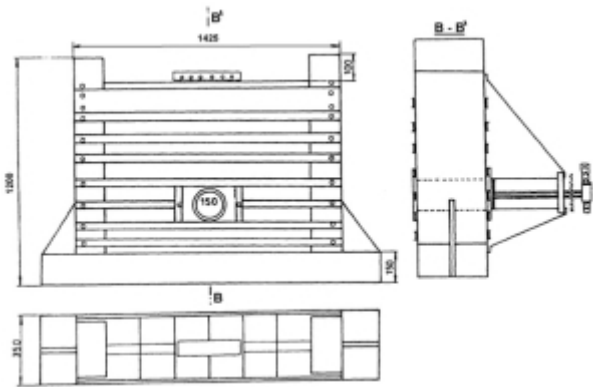


Abb.3. Schema der Modellanlage für die Experimente.

Die Grundlage der Modellierung war, ein simuliertes Bergwerk mit einem plastischen Bereich (entstanden durch Befeuchtung) zu gestalten.

Zur Registrierung der Deformation in simuliertem Bergbau verwendete es Detektionspolster, die sich zum Messen und zugleich auch zum Simulieren des beanspruchten Ausbauwiderstands dienten. Vier Detektionspolster waren am Tragelement – einer dickwandigen Aluminiumwalze – zentral und stabil im Profil des ausgeschlagenen Modell-Werks angebracht (Abb. 5). Die einzelnen Detektionspolster waren über ein Auslassventil und einen elastischen Schlauch an ausklappbare Glasrohre mit einer Skala angeschaltet (Abb. 6).

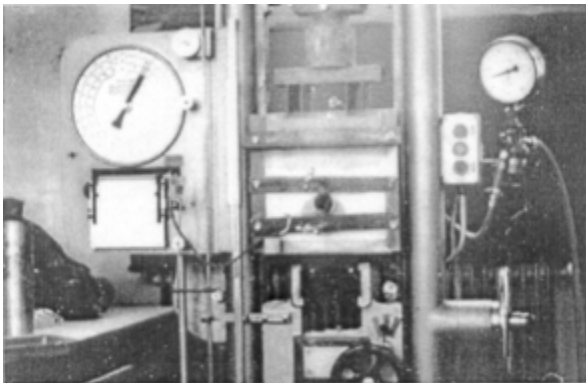


Abb.4. Ein Teil der Experimente durchgeführt im sog. Intermodell (allmählich Modell).

Ein konstanter Ausbauwiderstand bei gegebener Röhrenneigung wurde durch freien Überlauf des erhöhten Wasserspiegels erreicht, deren Menge wir in den Abmessungswalzen visuell beobachteten (Abb. 7) und mit einer Genauigkeit von 0,01g wogen. Das Messmedium Wasser war markant verfärbt, was ein präzises Ablesen auf der Wertskala ermöglichte.



Abb.5. Detektionspolster zur Registrierung der Deformation im Bergwerk.

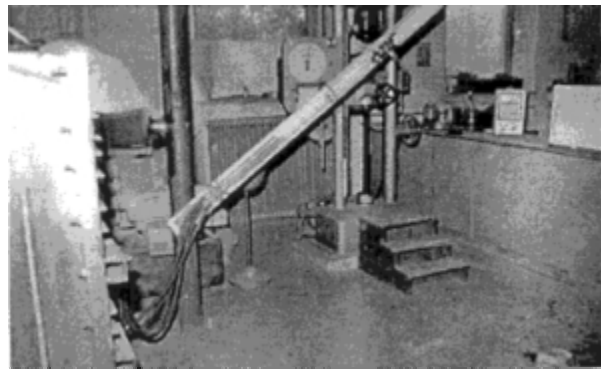


Abb. 6. Wasserspiegel in ausklappbare Glasrohre zum simulieren des Ausbaustand.

Die grosse Empfindlichkeit der Detektionspolster auf Deformationen und ihre Platzierung im profil der ausgeschlagenen Öffnung ermöglichte radiale Verschiebungen an der decke, an der Sohle und auch an den Seitenwänden des modellierten Bergwerkes (d.h. die Werte U_a) zu registrieren.

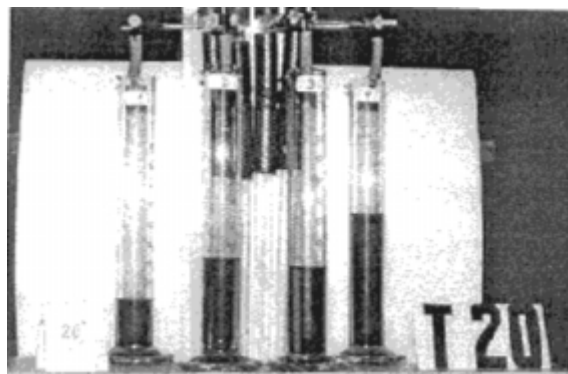
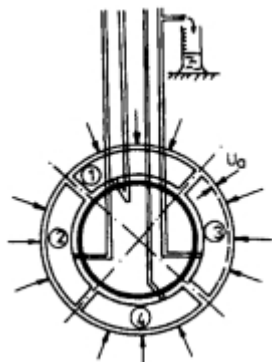


Abb.7a. Schematische Darstellung des Detektionspolster zur Registrierung der Deformation. 1-Decke der Bergwerkes, 2und 3- Seiten des Bergwerkes, 4-Sohle des Bergwerkes. Abb.7b. Abmessungswalzen zum Ablesen der Wasserverdrängung die Detektionspolster.

Die angegebene Art der Modellierung des Ausbauwiderstands durch ein System, das ermöglicht diesen Widerstand unabhängig zu ändern und gleichzeitig Deformationsmessungen der ringförmigen Öffnung mit einer Genauigkeit von minimal 0,01 mm durchzuführen, wurde in der Abteilung Gebirgsmechanik der Fakultät für Bergbau in Košice entwickelt. Der neue Laborsystem: PD&SR- Perimeter's Displacement & Support's Resistance (Đurove et al., 1993).

Modellmessungen

Zu den Experimentsergebnissen, geeignet zur Nutzung in der Bergbau Tunnelbaupraxis, legen wir folgende Unterlagen vor.

Aufgrund der Erfahrung mit dem sog. Intermodell hat es 2 Varianten der Realisierung des Experiments vorgeschlagen.

Die erste Variante stellt eine Detektion der Deformationsäusserung im "trocken" regime dar, mit dem es hat die Spannung-Deformationzustände im Umfeld des Grubenausschlag unter der Voraussetzung elastischen Gesteinverhaltens bei diversen Reaktionen des Ausbaus modellierten.

Die Detektion der radialen Deformation unter "nassen" Bedingungen stellt die zweite Experimentvariante dar, mit der es die Entstehung eines elasto-plastischen Bereichs an der Sohle des Bergwerkes modellierten.

Die eigentliche Experimentmethode kann man schematisch erklären. Bei einem konstanten Ausbauwiderstand q hat es mittels der Aufdrucks verschiedene Tiefen des Bergwerkes simuliert (σ_i), wobei es die absolute Deformation im Bereich des Werks U_a registrierten, speziell an der Decke, der Sohle und an den Seiten des Modell-Bergwerkes. Zugleich hat es in diesem Teil des Experiments den Zuwasch der absoluten Deformation der eizelnen Teile des Umfelds des Werks in Zeitabhängigkeit beobachtet. Elastische und dauerhafte Deformationen im Werkbereich hat es in einem Rückgang im sog. Ausgleichsast bewertetet. Der Vermerk der konkreten Messungen ist in Tab. 1 und Tab. 2 angeführt.

Tabelle 1. Der "trockene" Verlauf.

σ_i [MPa]	q_i [MPa]	U_{ai}^1 [mm]	U_{ai}^2 [mm]	U_{ai}^3 [mm]	U_{ai}^4 [mm]	ai^1 [%]	ai^2 [%]	ai^3 [%]	ai^4 [%]	$\frac{q_i}{\sigma_i}$ [%]	t_i [min]
0,05	0,01	0,08	0,00	0,04	0,04	0,11	0,00	0,05	0,05	20,0	10
0,10	0,01	0,20	0,04	0,12	0,12	0,27	0,05	0,16	0,16	10,0	10
0,15	0,01	0,60	0,12	0,20	0,20	0,80	0,16	0,27	0,27	6,6	10

Tabelle 2. Der "nasse" Verlauf.

σ_i [MPa]	q_i [MPa]	U_{ai}^1 [mm]	U_{ai}^2 [mm]	U_{ai}^3 [mm]	U_{ai}^4 [mm]	ai^1 [%]	ai^2 [%]	ai^3 [%]	ai^4 [%]	$\frac{q_i}{\sigma_i}$ [%]	t_i [min]
0,05	0,01	0,20	0,06	0,12	0,20	0,27	0,21	0,16	0,27	20,0	10
0,10	0,01	0,60	0,24	0,24	0,24	0,80	0,32	0,32	0,32	10,0	10
0,15	0,01	1,52	0,80	0,72	0,48	2,03	1,07	0,96	0,64	6,6	10

Die gemessenen Deformationen des Bergwerkbereichs unter Voraussetzung eines elasto-plastischen Verhaltens des Gesteins stellen die Werte zur Bestimmung der Funktion Ψ_2 im Bezug (1) dar.

Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Messungen am Modellausbau

Die Wandlung eines elastischen in elasto-plastischen Zustand berücksichtigt es in der Berechnung durch den Simplexwert, dann erhalten wir die Abhängigkeit der Ausschlagsdeformation vom Ausbauwiderstand in der Form:

$$\frac{U_a}{a} = \left(-0,13 + \frac{3,2 \cdot \sigma \cdot 10^{-2}}{q} \right) + 0,19 \quad (2)$$

davon beträgt die Ausbaubelastung:

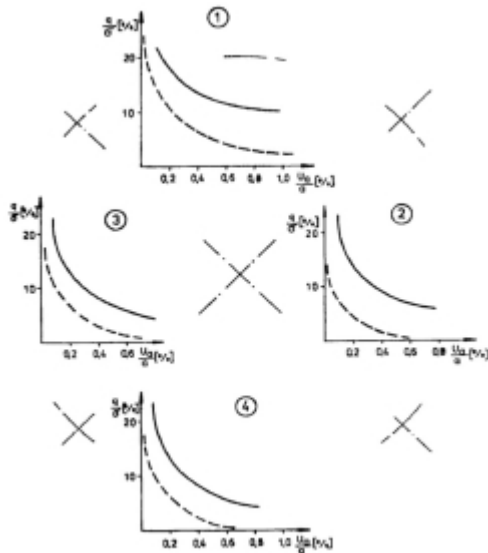
$$q = \frac{3,2 \cdot \sigma}{\frac{U_a}{a} - 0,6} \cdot 10^{-2} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Die Abhängigkeit der deformation vom Ausbauwiderstand, die es aus der Auswertung der Ergebnisse der Experimente im Regime "nass" erwarben, ist:

$$\frac{U_a}{a} = -0,37 + \frac{9,7 \cdot \sigma \cdot 10^{-2}}{q}, \quad (4)$$

davon:

$$q = \frac{9,7 \cdot \sigma}{\frac{U_a}{a} + 0,37} \cdot 10^{-2} \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$



Auch in diesem fall der Applikation von Schlussfolgerungen vom Modell zur Wirklichkeit wendet es entweder direkt die Gleichung (5) an, oder wir nützen die Äquivalenztransformation.

Die Abbildung der Ergebnisse der angegebenen Experimente ist in der Abb. 8.

⇐ Abb.8. Graphische Abbildung der Experimentergebnisse des physikalischen Modellierens. 1-Decke der Bergwerkes, 2und 3-Seiten des Bergwerkes, 4-Sohle des Bergwerkes (der „trockene“ Verlauf - - -, der „nasse“ Verlauf —).

Ergebnisanalyse

Bevor es die Ergebnisanalyse der Experimente vorlegen, ist es aus Gründen eindeutiger Auffassung der gemessenen Werte notwendig in Kürze die Voraussetzungen, aus deren es bei den Experimenten ausgegangen ist, zusammen.

Durch die physikalische Modellieren hat es ein horizontales Bergwerk simuliert, das den Förderungsprozess

nicht beeinflusst, wobei wir voraussetzen, dass

1. das Gebirgsmassiv homogen (tektonikfrei) ist,
2. das Werk im tonartigen Gestein ausgeschlagen ist,
3. die Bedingungen für Brüche durch die Umhüllende gegeben sind (nach Mohr)
4. es im Umfeld des Werks zu elastischen bis elastisch-plastischen Deformationen kommt,
5. die Oberfläche des Gebirgsmassivs im Verhältnis zu dem untersuchten Abschnitt des Bergwerks als eben betrachtet wird,
6. die Aufgabe es als horizontales Problem lösen,
7. es zugleich auch das Problem der Auslegung des Ausbau lösen.

Die verwirklichten Experimente ermöglichen folgende Schlussfolgerung zu formulieren:

- die Deformationen eines Bergwerks und die Belastung des Ausbau hängt mehr von der Festigkeit und dem physikalischen Stand des Gesteins, als von der Tiefe, in welcher das Werk errichtet wurde ab,
- die entstehende Deformationen sind durch eine Grösse begrenzt, die die Entfaltung des Plastizitätseffekts ermöglicht, d.h. eines markanten Einflusses der Grenzbedingungen in der Hydrogeologie,
- bei den Versuchung war der Tiefeeinfluss auf die Deformation des Bergwerks nicht gleichmässig: bis zu einer bestimmte Tiefe (repäsentiert eine äussere Zubelastung) war die Deformation gleich Null, dann wuchs mit sie dem Anwaschen der Tiefe ziemlich gleichmässig bis zu einem gewissen Wert des geostatischen Drucks. Nach Überschreitung dieses Werts verstärkte sich die Deformation des Ausbaus bedeutend. Diese Erscheinung wurde wie im "trockenen" als auch "nassen" Regime beobachtet, wobei es durch die

Zubelastung zum Einsinken des ganzen Bergwerks kam. Die Senkung der Decke war relativ geringer als das Absinken der Sohle, was dadurch erklärt werden kann, dass das ganze Bergwerk in den durchweichten Untergrund einsank, und umgekehrt, bei Druckentlastung zeigte sich in der Decke des Bergwerks sehr markant eine Deformation der Sohle. Wahrscheinlich kommt es beim Verringern der vertikalen Spannung zu einem markanteren Porenwasserdruck an der Sohle, was sich durch eine erhöhte Deformation des Werks manifestierte.

Prognose und Schlussfolgerung

Auch wenn man die Ergebnisse der Experimente über die Deformation der Bergwerke auf physikalischen Modellen so interpretieren kann, dass sie den realen Bedingungen nur annähernd entsprechen, haben sie doch praktische Bedeutung vom Aspekt der Aufklärung der Gesetzmäßigkeiten der Entstehung und dem Verlauf unterirdischer anomaler Druckeffekte. Sie bestätigen, dass einer der Hauptfaktoren, der den Verlauf der Deformationscharakteristik des Gesteinsmassivs im Umfeld eines Bergwerks beeinflusst, die Veränderungen des physikalischen Zustands des Gesteins ist. Konkret geht es um den Festigkeitsverlust eines tonartigen Gesteins infolge der Änderung seiner Humidität in einem Teil des Ausschlags. Aus den angeführten Tatsachen geht hervor, dass vom praktischen Gesichtspunkt aus das ungünstige Anwachsen der Deformation des Gesteinsmassivs und dadurch das Anwachsen der Ausbaubelastung bei Anwachsen der Feuchte im tonartigen Gestein eliminiert werden muss und zwar entweder durch eine konsequente Isolation der Sohle (besonders durch Abschöpfung konzentrierter Zuflüsse unterirdischer Gewässer), oder durch eine Änderung der Deformationscharakteristik des Ausbaues.

Literaturverzeichnis

- Atze, H., Kubick, W. und Lösching, P.: Vortrieb und Sicherung des Hofbergtunnels in Landshut. *Tunnel 2/1997, Int. Fachzeitschrift für unterirdischen Bauen. STUVA Köln.*
- Bukovanský, S.: Podmínky součinnosti porubní výstuže při rychlých dynamických dějích se zřetelem k důlním podmínkám v OKR. *Sborník vědeckých prací č. 1/1998. VŠB-HGF- TU Ostrava.*
- Bukovanský, S.: Stabilita chodeb při dynamickém zatížení ve vztahu k důlním otřesům v OKR. *Sborník vědeckých prací č. 3/1998. VŠB-HGF- TU Ostrava.*
- Đurove, J., Hatala, J., Maras, M., Hroncová, E.: Support's design based on physical modelling. *Proc. of Int. Symposium: "Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks", Athens 20.-23. Sept. 1993. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/1993, p. 1417-1426.*
- Đurove, J.: Teória podobnosti a modelovanie v mechanike hornín a masívu. *AMS 1/1999, F BERG, TU Košice.*
- Egger, P.: Rock pressure in tunneling and stabilization of the tunnel face in rock beyond failure. *Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver 1974.*
- Fumagalli, E.: Statical and Geomechanical Models. *Springer Verlag, Wien 1973.*
- Golser, J., Hinkel, J.W. and Schubert, W.: Sammelband 1 u. 2: "WORLD TUNNEL CONGRES'97", Vienna, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield 1997.
- Grosse, H., Lehmann, G. und Mittag, M.: Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt. Band 1., 2. Auflage (Grundwerk, Dresden 1995). *Mittag-Verlag GesmbH, Maria Rain.*
- Hatala, J.: Stabilita dlhých banských diel v podmienkach hornonitrianskej uhoľnej panvy. *KDL BF VŠT, Košice 1984.*
- Hučko, A.: Výskum prejavov horninových tlakov metódou modelovania pomocou ekvivalentného materiálu. *Výskumná správa VVS pre hnedé uhlie, Prievidza 1963.*
- Keil, K.F.G.: Geotechnik. VEB W. Knapp Verl., Halle (Saale) 1959.
- Kožešník, J.: Teorie podobnosti a modelování. *Academia, Praha 1983.*
- Machálek, M.: Prognóza anomálných prejavů horských tlaků použitím modelu z ekvivalentních materiálů. *Záv. správa VVUU, Ostrava, Radvanice 1980.*
- Maras, M. a Vavrek, P.: Riešenie stabilnej problematiky pri dobývání striebornej žily na ložisku Mária v Rožňave. *Proc. Int. Conf. "GEOTECHNICS'97 – The Rudiment of Modern Technology of Construction". Podbanské - High Tatras 28.-30.10.1997. BERG Faculty, TU Košice 1997, p. 140-142.*
- Sedlatý, V.: Niektoré aspekty modelovania vetrania veľkopriestorových banských diel. *Zb. 8. banickej vedeckotechnickej konferencie. BF TU v Košiciach 1992, p. 172-181.*
- Sturm, F.: 150 Jahre MU Leoben. *Akademische Druck- u. Verlagsanstalt, Graz – Austria, 1990.*