AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften ZENTRALINSTITUT FUR PHYSIK DER ERDE

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde Nr. 101

Der barometrische Belastungseffekt im Bergwerk

Meßergebnisse und Anwendungsmöglichkeiten

von Dietrich Simon

Herausgeber: Der Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam

> Als Manuskript gedruckt Potsdam 1989

Zusammenfassung

Im Beitrag wird der barometrische Belastungseffekt anhand von Meßbeispielen aus dem Werrakalirevier beschrieben und seine mögliche Anwendung als Eichsignal bei der Messung von sprunghaften Pfeilerbelastungsänderungen erläutert.

Summary

The paper describes the barometric loading effect using measuring samples from the Werrakalirevier and explains the possible application of the effect as a calibration signal for measurements of stepwise variations of the pillars loading pressure.

Резюме

Статья описывает эффект барометрической нагузки в горном деле на основании результатов измерения из Калийного района реки Верра/ГДР и обясняет одно из возможных применений этого эффекта в качестве сигнала калибрировки при измерениях скачкообразных переменах нагрузки столбов.

1. Einleitung

Werden zum Beispiel im Werrakalirevier in Gruben mit Baufeldgrößen von 100 km und mehr die Hauptgrubenlüfter eingeschaltet, so kommt es innerhalb von wenigen Minuten offenbar im gesamten Grubenfeld zu meßbaren elastischen Deformationen des Hangenden, Liegenden und der Pfeiler.

Die gemessenen Deformationsbeträge entsprechen den Wirkungen einer Zusatzlast von mehreren Millionen Tonnen, die innerhalb der genannten Zeitspanne auf das Deckgebirge des Hohlraumsystems aufgebracht und gleichmäßig verteilt werden müßte. Die Zusatzdeformation des Salzgebirges hält so lange an, bis die Hauptgrubenlüfter – meistens erst nach einigen Tagen – wieder abgeschaltet werden.

Im folgenden wird der barometrische Belastungseffekt anhand von Meßbeispielen aus dem Werrakalirevier beschrieben und mit Hilfe von einfachen Modellrechnungen näherungsweise gedeutet.

2. Die Meßergebnisse und ihre Deutung

2

2.1 Meßstellen und Geräte

An den beiden untertägigen Gezeitenstationen Tiefenort (Abb.1) und Stadtlengsfeld (Abb. 2) des Zentralinstitutes für Physik der Erde der AdW der DDR waren in den letzten 20 Jahren etwa 40 Meßstellen mit Gezeitenklinometern unterschiedlichen Typs zeitweilig oder ständig besetzt. Die Neigungsregistrierungen wurden zunächst mit den weniger empfindlichen SCHWEYDAR- und TOMASCHEK-ELLENBERGER-Pendeln durchgeführt, die nur eine Auflösung von 0.8 - 1.0 x 10⁻³ "/mm besitzen. Seit 1978 wurden jedoch auf beiden Stationen die sowjetischen OSTROVSKIJ-Klinometer mit einer maximalen Auflösung von 2 x 10⁻⁴ "/mm eingesetzt.

An allen diesen Meßstellen wurden beim Ein- bzw. Ausschalten der Hauptgrubenlüfter in 5.8 km bzw. 1.5 km Stationsentfernung Neigungsänderungen der Streckensohle von der Art registriert, wie sie in den Abb. 3, 4 und 6 dargestellt sind.

2.2 Meßbeispiele von der Station Tiefenort

In Abb. 3 sind die Registrierungen von 4 OSTROVSKIJ-Klinometern aus der Zeit vom 17.04.78, 16^h bis 18.04.78, 4^h UT dargestellt. Die vier Neigungsmesser A1, A2, B1 und B2 waren zu dieser Zeit gemäß Abb. 1 zu beiden Seiten eines Steinsalzpfeilers von etwa 10 m Breite installiert und registrierten alle in der Meßrichtung EW. Abb. 3 zeigt ferner eine Registrierung des untertägigen Luftdruckes, die zur selben Zeit mit einem Askania-Barographen in unmittelbarer Nähe der Klinometermeßstellen erhalten wurde. Hierin sind die Wirkungen von mehreren Lüfterschaltungen erkennbar, die zu sprunghaften Änderungen des Luftdruckganges führten, nämlich am 17.04. um 19.50, 22.40, und 23.50 UT und am 18.04. um 2.30 UT.

Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß bei einer Luftdruckverminderung (18.04., 2.30 UT) die westlich vom Pfeiler installierten Klinometer B1 und B2 nach Osten und die östlich vom Pfeiler registrierenden Geräte A1 und A2 dagegen nach Westen ausschlagen, obwohl alle 4 Neigungsmesser die gezeitenbedingte Lotschwankung übereinstimmend phasenrichtig aufzeichnen. Das wird am nächsten Meßbeispiel (Abb. 4) noch besser erkennbar. Hier sind die Meßkurven der Klinometer A1 und B1 während einer etwa 10-tägigen Registrierperiode dargestellt. Im unteren Teil dieser Abbildung werden die gleichzeitig über und unter Tage aufgezeichneten Luftdruckkurven P0 und Pu miteinander verglichen (in Abb. 5 mit größerer Auflösung).

Zur Eliminierung des Gezeitenanteils aus den Registrierkurven A1 und B1 der beiden im Azimut EW registrierenden Neigungsmesser ist ein Optimierungsverfahren verwendet worden. Dabei bestimmt man durch Summation der Kurven A1' und KB1' (der Faktor K wird schrittweise geändert) die Gezeitenkurve, die an den Sprungstellen des Barogramms, z.B. am 30.04.78, 14.00 UT die kleinsten Sprünge besitzt. Der optimale K-Wert wird mit Hilfe des Rechenverfahrens von LECOLAZET (1961) zur Sprunghöhenbestimmung ermittelt.

Durch den Ausdruck (1+K) dividiert und damit auf den richtigen Maßstab gebracht, wird die erhaltene Gezeitenkurve dann von den Registrierungen der Klinometer A1 und B1 abgezogen. Man erhält die im mittleren Teil der Abb. 2 dargestellten Nichtgezeitenkomponenten A1" und B1" der Neigungsregistrierungen.

Ein Vergleich von A1" und B1" mit den entsprechenden über- und untertägigen Luftdruckkurven Po und Pu führt zu den folgenden Resultaten:

- die natürlichen Luftdruckvariationen haben über und unter Tage annähernd den gleichen Verlauf. Ihre Schwankungsbreite ist erheblich größer als die der künstlichen Luftdruckvariationen, welche durch Ein- und Ausschalten der Grubenlüfter in den untertägigen Hohlräumen hervorgerufen werden. Doch in den Neigungskurven A1" und B1" dominieren eindeutig die Wirkungen der künstlichen Luftdruckänderungen;
- der festgestellte Zusammenhang zwischen den Neigungseffekten und den künstlichen Luftdruckänderungen scheint darauf hinzuweisen, daß Störungen des Gleichgewichtes der am Deckgebirge angreifenden Vertikalkräfte die möglichen Ursachen der Neigungseffekte sind;
- für die o.g. Deutung sprechen auch die Richtungen der gemessenen Sohlenneigungen: bei künstlicher Verminderung des untertägigen Luftdruckes (z.B. am 01.05.78, 22.00 UT) werden zu beiden Seiten des Pfeilers Sohlenneigungen angezeigt, die auf eine Zusatzbelastung des Pfeilers hinweisen. Umgekehrt ergeben sich bei künstlicher Vergrößerung des untertägigen Luftdruckes Sohlenneigungen von der Art, wie sie bei einer Belastungsverminderung des Pfeilers auftreten müßten;
- wie anhand der Klinometerregistrierungen z.B. während der etwa 30-stündigen Abschaltpause der Lüfter vom 30.04. bis 01.05.1978 erkennbar ist, handelt es sich bei den untersuchten Neigungseffekten in erster Linie um <u>reversible</u> Vorgänge. Die elastische Komponente der belastungsbedingten Sohlendeformation erreicht offenbar wesentlich größere Beträge als deren plastischer Anteil.

2.3 Meßbeispiele von der Station Stadtlengsfeld

Weiteren Aufschluß über die Art der Deformation des Salzgebirges in der Umgebung bergmännischer Hohlräume beim Ein- und Ausschalten der Grubenlüfter brachten die in der Zeit von Juni 1978 bis April 1979 durchgeführten Klinometerregistrierungen auf der Station Stadtlengsfeld.

Wie aus Abb. 2 ersichtlich, wurden die Neigungsmessungen hier in der Umgebung von 40 m breiten quadratischen Pfeilern durchgeführt. Die Deckgebirgsmächtigkeit beträgt hier etwa 400 m, während sie an der Station Tiefenort Beträge von 295 - 300 m erreicht.

Für die Interpretation der in Abb. 6 dargestellten Neigungsregistrierungen ist von Bedeutung, daß die DSTROVSKI-Klinometer sowie der hier ebenfalls eingesetzte Askania-Barograph in einem Fluchtraum (Gasschutzraum) registrierten. Der Fluchtraum war in dieser Zeit mit Doppelschleusentüren und Mauern gegen das Eindringen von CD₂ abgeschirmt.

Eine solche Ummauerung bewirkt, daß sich bei Lüfterschaltungen der Luftdruck innerhalb der in Abb. 2 dargestellten Schutzraumgrenzen langsamer ändert als im Außenraum. Das ist an den Barogrammen von Abb. 6 deutlich zu sehen. Die Endwerte der künstlichen Luftdruckänderungen werden jeweils erst 50 – 60 Minuten nach erfolgter Lüfterschaltung erreicht. Die Registrierungen der Klinometer folgen jedoch der im Fluchtraum gemessenen Luftdruckkurve nicht: die Neigungsmesser zeigen schon 5 – 10 Minuten nach Beginn der Luftdruckänderung den Endwert der entsprechenden Schlenneigung an.

Der geringe Einfluß der Luftdruckvariation im Fluchtkammerbereich auf den Ablauf der Sohlenneigung und der damit verbundenen Pfeilerbelastung bzw. Hangendabsenkung führt zu der Schlußfolgerung, daß es sich dabei um eine relativ weitspannige Deckgebirgssenkung handeln muß.

Zur Erklärung einer regionalen Deckgebirgsbewegung waren die folgenden Meßinformationen über Größe, Form und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Luftdrucksignals in einem größeren Bereiche des Grubenfeldes erforderlich.

2.4 <u>Zusammenhänge zwischen der regionalen untertägigen Luft-</u> druckvariation und dem Verlauf der Neigungskurven an beiden Stationen

Am 1. und 8.04.1979 wurden die an den benachbarten Schächten C und D installierten Hauptlüfter der Grube abgeschaltet und nach Ablauf von ca. 3 Stunden (01.04.) bzw. einer Stunde (08.04.) wieder eingeschaltet. Die entsprechenden Luftdruckänderungen sind an 9 Meßstellen im Grubengebäude mit Barographen unterschiedlicher Bauart (Askania-Luftdruckschreiber, Eigenbau-Barograph mit Druckdose und induktivem Wegaufnehmer, Barographen der Fa. Fischer/ Drebach) aufgezeichnet worden. Die Meßstellen hatten von den Schächten C, D folgende Abstände:

| Meßst | - | | Abstand z. ausz |
|-------|---|-------------|-----------------|
| NF . | | Bezeichnung | achacht |
| | | | 30 m |
| 2 | | | 500 m |
| 3 | | | 1200 m |
| 4 | | | 1400 m |
| 5 | | Station STL | 1500 m |
| 5 | | | 3250 m |
| 7 | | | 3850 m |
| 3 | | | 4450 m |
| 7 | | Station TIE | 5800 m |

Abb. 7 zeigt die Amplitudenabnahme des Luftdrucksignals mit wachsendem Abstand vom ausziehenden Schacht. Als Abstände vom Lüfter (Schacht) wurden die vom Grubenriß abgegriffenen Horizontalabstände verwendet, die sicher kürzer sind als die vom Luftdrucksignal längs der Wetterwege zurückgelegten Strecken.

Während der beiden Meßkampagnen wurde als größte durch Lüfterschaltungen verursachte Luftdruckänderung am 01.04.79 eine

DOI: https://doi.org/10.2312/zipe.1989.101

12

Variation von 8.3 mbar am ausziehenden Schacht gemessen. Die entsprechende Luftdruckänderung an der vom Schacht am weitesten entfernten Meßstelle (Station Tiefenort) berug 2.35 mbar. Um die Signalformen zu vergleichen, wurden die Luftdruckregistrierungen von 3 Stationen in Abb. 8 auf ihre Maximalamplituden normiert und zeitlich so gegeneinander verschoben, daß keine wesentlichen Phasendifferenzen mehr auftreten. Man erkennt, daß in den nicht abgemauerten Bereichen des Grubenfeldes der Endwert der Luftdruckvariationen in kürzerer Zeit (30 - 40 min) erreicht wird als innerhalb der Fluchtkammer (50 - 60 min).

Die Formabweichungen der in größerer Entfernung voneinander erhaltenen Luftdruckkurven sind gering.

Das Luftdrucksignal taucht in den Registrierungen der Station Tiefenort (Schachtentfernung 5,8 km) etwa 3 Minuten später auf als im Barogramm der Meßstelle 1 (30 m Schachtentfernung). Während des Versuches bestand Sprechverbindung zwischen diesen Meßstellen.

Die im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit in Luft (333 ms⁻² = 20 km/min) geringere scheinbare Ausbreitungsgeschwindigkeit des Luftdrucksignals hängt sicherlich damit zusammen, daß die tatsächlichen Wetterwege erheblich länger sind als die aus dem Grubenriß abgegriffenen Horizontalentfernungen. Außerdem wird durch die Reibungseffekte die Ausbreitungsgeschwindigkeit verringert; wegen der Amplitudenverminderung mit wachsender Distanz ist es wahrscheinlich, daß der Einsatz im Barogramm von Tiefenort möglicherweise zu spät erkannt wird. Die Ausbreitung des Luftdrucksignals im Grubenfeld erfolgte an beiden Meßtagen, möglicherweise wegen eines offengebliebenen Wettertores, uneinheitlich. Deshalb sind die Beobachtungsdaten beider Kampagnen gemittelt und in Abb. 9 näherungsweise durch die Funktion

 $\Delta p(r,t) = \frac{(-0.811 r + 7.56)(1 - e^{-0.034 L_{7} - 0.5 r_{7} t})}{r/km}$

dargestellt worden. Jetzt wird deutlich, warum die natürlichen Luftdruckvariationen über und unter Tage nahezu den gleichen Verlauf haben: die Leistung der Hauptlüfter ist so groß, daß schon nach wenigen Minuten eine Änderung des natürlichen Luftdruckes im entferntesten Winkel des Grubengebäudes spürbar wird.

2.5 <u>Vorläufige Deutung der Unterschiede zwischen den Meßkurven</u> <u>der Stationen STL und TIE</u>

Unter Verwendung der im Abschnitt 2.4 mitgeteilten Meßergebnisse soll hier versucht werden, die Diskrepanzen zwischen den Meßkurven der Stationen STL und TIE zu erklären.

Gegenstand dieses Deutungsversuches sind die in der folgenden Tabelle noch einmal zusammengestellten abweichenden Eigenschaften der Luftdruck- und Neigungskurven:

| Vergleichskurve | Zeit v. Signalbeginn b. z. Erreichen d. Maximal- wertes | Quell | Quelle | |
|--------------------|---|-------|--------|--|
| Neigungskurve STL | 5 - 10 min | Арр. | 6 | |
| Luftdruckkurve STL | 50 - 60 min | Abb. | 6 | |
| Neigungskurve TIE | 30 - 40 min | Abb. | 1 | |
| Luftdruckkurve TIE | 30 - 40 min | Abb. | 1 | |
| Luftdruckkurve | | | | |
| MP 4 und MP 5 | 30 - 40 min | Abb. | 8 | |

Bei der vorläufigen Deutung dieser Meßergebnisse spielt der Effekt der Überzugs- oder Fernwirkung von Feldesteilen mit verstärkter oder mit verminderter Nachgiebigkeit des Salzgebirges gegenüber Beanspruchungen durch Vertikalkräfte eine dominierende Rolle.

Genauere Informationen über die Fern- oder Überzugswirkung, d.h. über die gegenseitige Beeinflussung bereits abgebauter und im Abbau befindlicher Abbaublöcke, findet man in jedem Lehrbuch der Bergbaukunde (z.B. GIMM, (Hrsg.): Kali und Steinsalzbergbau, Bd.I (1968)). Im Salzbergbau gilt die Regel, daß die Wirkungen eines einzelnen Abbaublockes noch in einer Entfernung von 5 Ffeilerbreiten (ca. 250 m) makroskopisch erkennbar sind. Und wenn, was im Bergbau nicht üblich ist, gleichzeitig in allen Feldesteilen rund um ein Meßgebiet von 250 × 250 m² Grundfläche abgebaut werden würde, so wäre der Fall denkbar, daß die von den Abbauarbeiten im Meßgebiet herrührenden Senkungsbewegungen des Hangenden durch die Summe der Überzugswirkungen der Nachbarblöcke wesentlich übertroffen und überdeckt werden.

In diesem Sinne sind vielleicht die Meßergebnisse der Station STL zu interpretieren, wo sich der barometrische Belastungseffekt weniger nach der lokalen Luftdruckvariation innerhalb der Fluchtkammer als nach der Hangendsenkung in der kleinregionalen Umgebung des Meßgebietes richtet.

Zur vorläufigen Deutung der Unterschiede zwischen den Meßkurven der Stationen STL und TIE wird die folgende Arbeitshypothese verwendet:

Im Gegensatz zum normalen Abbaugeschehen, bei dem die Lastumverteilung in erster Linie von den wenigen zur Zeit im Abbau befindlichen Feldesteilen ausgeht, erfolgt beim barometrischen Belastungseffekt eine Änderung der Belastungssituation über dem gesamten Grubenfeld. Infolgedessen ist der relative Anteil der Überzugswirkungen der Nachbargebiete an den Senkungsbewegungen eines einzelnen Feldesteils erheblich größer als beim Vergleichsbeispiel der abbaubedingten Bewegungen.

Aus dem Grubenriß geht hervor, daß die beiden ausziehenden Schächte C und D (mit den Grubenlüftern) sowie die Station STL im zentralen Teil des Grubengebäudes, die Station TIE und die beiden einziehenden Schächte A'und B dagegen am NE-Rande des ausgedehnten Hohlraumsystems liegen.

Infolgedessen bildet sich bei einer Einschaltung der Lüfter zunächst nur im zentralen Bereiche des Hohlraumsystems im Um-

~7

kreis der Schächte C und D eine Zone verminderten untertägigen Luftdrucks, die wegen der guten Durchörterung des Salzgebirges in diesem Gebiet sich im Abbauhorizont nahezu radial ausbreiten kann.

Aus dem gleichen Grunde beginnt auch die Einmuldung des Hangenden über dem zentralen Teil des Hohlraumsystems. Dabei bringt die Superposition der Überzugswirkungen der Nachbarparzellen gleicher Fläche für ein Meßgebiet im zentralen Teil des Hohlraumsystems (STL) erheblich rascher zunehmende Hangendsenkungen bzw. Pfeilerbelastungszunahmen als für ein Meßgebiet am Rande des Grubenfeldes (TIE),

- weil im zentralen Teil das Salzgebirge wegen seines höheren Durchörterungsgrades nachgiebiger auf Belastungszunahmen reagiert,
- weil im zentralen Teil die künstliche untertägige Luftdruckverminderung größere Beträge hat,
- weil sich im zentralen Teil das Unterdruckgebiet radial erweitern kann, während es in der Randzone am Unverritzten Halt machen muß.

Je mehr sich dieser zusätzliche Trog vertieft bzw. radial erweitert, umso stärker werden die Hangendschichten sowie das Unverrritzte der Randzone und der Restpfeiler auch in horizontaler Richtung beansprucht und die weniger nachgiebigen Randzonen des Hohlraumsystems in die Senkungsbewegung einbezogen. Das führt im zentralen Teil des Hohlraumsystems zu einer Verminderung der Senkungsgeschwindigkeit des Hangenden. Damit beginnt auch in der Pfeilerbelastungskurve der Station STL die überzugswirkung der schwerer deformierbaren Randzone (Unverritztes) eine Rolle zu spielen.

Es wird demnach behauptet, daß der Verlauf der klinometrischen Meßkurven der Station STL zumindest während der ersten 4 - 6 Minuten nach erfolgter Lüftereinschaltung in erster Linie durch die Überzugswirkungen der Feldesteile in der kleinregionalen Umgebung des Meßgebietes erklärt wird und sich erst später der vom Betrag her geringere Trend durchsetzt.

Am Rande des Hohlraumsystems (Station TIE) scheint dagegen in der resultierenden Senkungskurve des Hangenden von Anfang an die Komponente der regionalen Einmuldung zu dominieren. Denn im Stationsbereich erreicht die künstliche Luftdruckminderung nur geringe Beträge, die allein nicht ausreichen würden, um das Unverritzte der Randzone vergleichbar stark zu deformieren. In diesem Zusammenhang wird auf die Meßergebnisse der Tiefenorter Strainmeter (SIMON und HARWARDT (1987)) verwiesen, in denen ebenfalls der Einfluß der regionalen Einmuldung des Hangenden über dem bergmännischen Hohlraumsystem die lokalen Bewegungskomponenten deutlich überwiegt.

Zur Bestätigung dieser Hypothese sind Neigungsmessungen an einigen anderen Stellen des Grubenfeldes mit unterschiedlichen Abständen zum ausziehenden Schacht erforderlich.

2.6 Karte der normierten Neigungen

Nach den überlegungen von Abschnitt 2.5 kann man offenbar davon ausgehen, daß in Feldesteilen von $200 \times 200 \text{ m}^2$ Grundfläche (Beispiel: Gebiet der Station Tiefenort) bei barometrischer Zusatzbelastung eine nach zeitlichem Ablauf und Betrag einheitliche Senkungsbewegung des Deckgebirges stattfindet. Die entsprechenden Bodenneigungen am Fuße der Pfeiler müßten demnach, wenn sie auf die gleiche künstliche Luftdruckänderung von beispielsweise 1 mbar normiert werden, durch das Verhältnis

 $Q = F_{H} / F_{P}$

F_H Hohlraumgründfläche in der Umgebung des Pfeilers

(hier versuchsweise Rasterfläche von 50 x 50 m² Größe) F_{e} belastete Grundfläche des Pfeilers

näherungsweise erklärbar sein.

Abb. 10 zeigt die normierten luftdruckbedingten Bodenneigungen an insgesamt 35 Meßstellen im Bereiche der Station Tiefenort. An 2 Stellen wurde die Rasterfläche über den Stationsgrundriß gelegt und das Flächenverhältnis Q berechnet.

Dort, wo der größere Wert von Q ermittelt wurde, sind auch die luftdruckbedingten Bodenneigungen senkrecht zum Pfeilerstoß größer.

Die Messungen am Pfeilerstoß in Richtung des Pfeilers sowie in Streckenmitte ergaben sehr kleine Neigungsbeträge. So wurde auf dem Meßplatz des Pendels B1 in Pfeilerrichtung ein Wert von o.2 x 10^{-3} "/mbar, senkrecht dazu der Wert 4.7 x 10^{-3} "/mbar gemessen.

Wegen der geringen Basislänge der Pendelklinometer (OSTROVSKIJ-Pendel: 0.22 m) sind ihre Meßergebnisse der belastungsbedingten Bodenneigungen jedoch anfällig gegenüber Verfälschungen durch Sohlenrisse, wie sie als Folge der Sprengarbeiten in Salzstrecken bis zu einer Tiefe von 1.5 m unter der Sohlenoberfläche (Sprengrißzone) auftreten können. Der im Nordteil der Station am Pfeiler gemessene relativ kleine Neigungsbetrag von 2.6 x 10⁻³ "/mbar (s. Abb. 10) könnte durch einen solchen Sprengriß verfälscht sein. Durch die Vergrößerung der Meßbasislänge der Klinometer von 0.22 m (OSTROVSKIJ-Pendel) auf 10 m (Niveauvariometer) müßte sich der Einfluß der Sprengrisse auf die gemessenen Beträge der luftdruckbedingten Neigungsbewegungen stark reduzieren lassen.

2.7 Modellrechnungen zur Deutung der gemessenen Bodenneigungen

Um die gemessenen Neigungsbewegungen auch quantitativ näherungsweise zu deuten, wurde der Effekt als Halbraumbelastungsproblem behandelt.

Für diesen Fall sind in der Literatur Lösungen einiger Randwertprobleme angegeben.

Allen diesen Modellaufgaben ist gemeinsam, daß sie nur für Belastungsflächen von Kreisform (oder für Punktbelastungen) gelten. Das ermöglicht eine Darstellung in Zylinderkoordinaten

9

 $(r, \mbox{\boldmath$\phi$}, z),$ wobei z nach unten (in den belasteten Halbraum hinein) weist. Im folgenden werden die Randbedingungen (RB) und Lösungen von 3 derartigen Randwertaufgaben zusammengestellt.

Fall 1 (FRANK und v. MISES (1961))

- RB: gleichmäßige Lastverteilung über die gesamte Belastungsfläche
 - gleichmäßige Einsinktiefe des kreiszylindrischen Stempels
 - Spannungsfreiheit an der Oberfläche des Halbraumes z = 0
 die elastischen Parameter des Halbraumes unter der Belastungsstelle sind die gleichen wie die unter der unbelasteten Halbraumoberfläche.

$$G_{zz} (r,0) = G_{zz}^{0} = \frac{P}{\pi a^{2}}$$

$$G_{zx} (r,0) = 0$$

$$G_{zy} (r,0) = 0$$

$$S_{z} (r,0) = S_{z}^{0} = const$$

$$G_{zx} (r,0) = 0$$

$$G_{zy} (r,0) = 0$$

$$für r > a$$

Lösungen:

$$S_{z}(r,0) = \begin{cases} \frac{(m-1)P}{4Gma} & \text{für } r \neq a \\ \\ \frac{2}{\pi} \frac{(m-1)P}{4Gma} & \text{arc } \sin(\frac{a}{r}) & \text{für } r > a \end{cases}$$

Hier bedeuten

 $\begin{aligned} & \textbf{G}_{\textbf{ij}} \ (r,0) & i=z; \ \textbf{j}=x,y,z & \textit{Oberflächenspannungen} \\ & \textbf{S}_{\textbf{Z}} \ (r,0) & \textit{Senkung der Halbraumoberfläche} \\ & \textbf{P} = \textit{Belastungskraft} & r = (x^{\textbf{Z}} + y^{\textbf{Z}})^{\textbf{\eta}/\textbf{Z}} \\ & \textbf{a} = \textit{Radius der Belastungsfläche} \\ & \textbf{m} = \textit{Querkontraktionszahl} \\ & \textbf{G} = \textit{Righeitsmodul} \end{aligned}$

10

Eall 2 (LAMB (1902), FARRELL (1972))

RB: - gleiche RB wie Fall 1, jedoch ohne die Bedingung der konstanten Vertikalverschiebung im Bereiche der Belastungsstelle r \leq a; λ , μ = Lame'sche Parameter

Lösungen:

$$S_{z}(r,0) = \begin{cases} \frac{(\lambda+2/u)P}{\hat{\pi}^{2}/u(\lambda+/u)} \frac{1}{a} \in (\frac{r}{a}) & \text{für } r \leq a \\ \frac{(\lambda+2/u)P}{\hat{\pi}^{2}/u(\lambda+/u)} \frac{r}{a^{2}} \int (\frac{r}{c}) - (1-\frac{a^{2}}{r^{2}})K(\frac{a}{r}) \int für r \geq a \end{cases}$$

E $(\frac{r}{a})$ und K $(\frac{r}{a})$ bezeichnen die vollständigen elliptischen Integrale 1. und 2. Ordnung.

Eall 3 (TERAZAWA (1916), FARRELL (1972))

- RB: elliptische Lastverteilung über der kreisförmigen Belastungsfläche
 - keine Vorschrift bezüglich der Vertikalverschiebung im Bereich der Belastungsstelle r 4 a
 - die elastischen Parameter des Halbraumes unter der Belastungsstelle sind die gleichen wie unter der unbelasteten Halbraumoberfläche

$$G_{zz}(\mathbf{r},0) = G_{zz}^{\max}(1-\frac{r^{2}}{a^{2}})^{y^{2}}$$

$$G_{zr}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{z\varphi}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{zz}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{zr}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{z\varphi}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{z\varphi}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{z\varphi}^{\max}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{z\varphi}^{\max}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{z\varphi}^{\max}(\mathbf{r},0) = 0$$

$$G_{zz}^{\max}(\mathbf{r},0) = 0$$

Lösungen:

$$S_{z}(r,0) = \begin{cases} \frac{3(\lambda+2/u)C}{16/u(\lambda+/u)} \frac{1}{a} (1-\frac{r^{2}}{2a^{2}}) & \text{für } r \leq a \\ \frac{3(\lambda+2/u)C}{-\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{(1-\frac{r^{2}}{2a^{2}})} & \text{arc } \sin(\frac{a}{r}) + \frac{r}{2a}(1-\frac{a^{2}}{r^{2}})^{\frac{1}{2}} \\ \frac{3(\lambda+2/u)C}{-\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{(1-\frac{r^{2}}{2a^{2}})} & \text{arc } \sin(\frac{a}{r}) + \frac{r}{2a}(1-\frac{a^{2}}{r^{2}})^{\frac{1}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{(1-\frac{r^{2}}{2a^{2}})} & \text{für } r \geq a \end{cases}$$

DOI: https://doi.org/10.2312/zipe.1989.101

11

Unser Belastungsproblem weicht von diesen Randwertaufgaben in einigen Punkten ab:

- die Belastungsfläche ist nicht kreisförmig. Der Kreisform näher kommen die Pfeilergrundflächen im Bereich der Station Stadtlengsfeld (quadratische Pfeiler). In Tiefenort haben wir es dagegen mit langgestreckten Rechteckpfeilern zu tun;
- der Halbraum in der Umgebung der Belastungsstellen ist wegen der Existenz weiterer Pfeiler in Entfernungen von 10 - 22 m nicht spannungsfrei. Wenn wir jedoch die Bodenneigungen in unmittelbarer Nähe des Pfeilerstoßes betrachten, ist der Belastungseffekt des untersuchten Pfeilers groß im Vergleich zur Wirkung der Nachbarpfeiler;
- die elastischen Parameter des Halbraumes unter der Belastungsstelle haben größere Beträge als die Parameter des Mediums unter der unbelasteten Streckensohle. Experimentelle Angaben über die Betragszunahme der elastischen Parameter mit wachsendem Belastungsdruck (bzw. zunehmender Teufe) wurden dem Buch von DREYER (1975) entnommen.

In der folgenden Modellrechnung sind für den Halbraum einheitliche elastische Parameter mit den Beträgen

 $E = 7.2 \times 10^{47}$ kp cm⁻² m = 2.8

verwendet worden, die für Steinsalz in einer Teufe von 300 m (Belastungsdruck ca. 75 kp cm $^{-2}$) gelten sollen;

 die Spannungsverteilung über der Grundfläche des untersuchten Ffeilers ist nicht bekannt. Doch nach den Modellrechnungen von MENZEL (s. KNOLL (1981), Abb .4) und den Schallgeschwindigkeitsprofilen von UHLMANN (1957) kommen eliptische Lastverteilungen den tatsächlichen Verhältnissen wohl am nächsten.

Unter Verwendung der Lösungen für die Randwertaufgaben 1-3 sind in Abb. 11 die Vertikalverschiebungen S_Z (r,0) der Oberfläche eines Halbraumes mit den olg. elastischen Eigenschaften für verschiedene Lastverteilungen über der kreisförmigen Belastungsfläche dargestellt. Dabei war lediglich die Forderung zu erfüllen, daß entsprechend den klinometrischen Meßergebnissen die Differenz der Vertikalverschiebungen

$$S_{Z}$$
 (4.6, 0) - S_{Z} (4.82, 0) = 2.133 × 10⁻⁶ m

beträgt. Bei einer Änderung des untertägigen Luftdruckes um 4 mbar war mit einem Ostrovskij-Klinometer von 0.22 m Basislänge an dieser Stelle in Richtung senkrecht zum Pfeilerstoß eine Neigungsänderung von 20 $\times 10^{-3}$ "gemessen worden. Für den Radius a der tragenden Fläche des Pfeilers wurde ein Betrag von a = 4 m angesetzt, denn die Pfeilerrandzone wird durch horizontal in den Pfeiler gebohrte Nischen von 0.8 – 1.0 m Tiefe geschwächt. In diesen Nischen registrierten z.B. die Klinometer B1 und B2. Die zur Erfüllung der o.g. Bedingung (Neigungsbetrag = 20 $\times 10^{-3}$ ") erforderlichen Werte für den mittleren Belastungsdruck der Pfeilergrundfläche liegen im Bereich von 600

12

Geht man andererseits davon aus, daß im Gebiet des untersuchten Pfeilers auf jeden Quadratmeter Pfeilergrundfläche das Doppelte an Hohlraumgrundfläche kommt, so ist bei einer Verminderung des untertägigen Luftdruckes um 4 mbar mit einer Zusatzbelastung des betreffenden Pfeilers um 800 N pro Quadratmeter Pfeilergrundfläche zu rechnen.

Bei aller Vorsicht, mit der die Ergebnisse dieser groben überschlagsrechnung wegen der o.g. Kompromisse bezüglich der Randbedingungen betrachtet werden müssen, kommt man bei der Abschätzung des Belastungsdruckes zumindest in die richtige Grössenordnung.

2.8 Abschätzung der Belastungsänderung des Deckgebirges bei Einschaltung der Hauptgrubenlüfter

Wir gehen bei dieser überschlagsrechnung von einem Baufeld von 10 x 10 km 2 Grundfläche aus, bei dem 50 % des Kaliflözes (Flöz Hessen) abgebaut und der Rest in Form von Stützpfeilern stehengelassen wurde.

Auf der unteren Sohle (Flöz Thüringen) soll ein Hohlraumsystem von gleicher Größe mit dem Verhältnis 1:1 von Hohlraumgrundfläche zu Pfeilergrundfläche vorhanden sein.

Wird der Luftdruck innerhalb des unteren Hohlraumsystems mit Hilfe der Hauptgrubenlüfter um durchschnittlich 4.5 mbar vermindert, so kommt es zu einer Störung des Gleichgewichtes der am Deckgebirge angreifenden Vertikalkräfte. Denn es verschwinden vertikale Druckkomponenten von 450 N m⁻², die an der Firstfläche dieses Hohlraumsystems von ca. 50 km² = 5 x 10⁷ m² effektiver Größe bis zu diesem Zeitpunkt angegriffen und das Deckgebirge in der entsprechenden Gleichgewichtslage mit gehalten haben. Das Deckgebirge sinkt infolgedessen in eine tiefere Gleichgewichtslage.

Eine ähnliche Deformation des Hangenden über dem unteren Hohlraumsystem müßte auftreten, wenn statt der künstlichen Luftdruckverminderung im Inneren der bergmännischen Hohlräume die Erdoberfläche über dem Baufeld von 10 x 10 km ² Größe beispielsweise durch Gesteinsmassen mit einem Gesamtgewicht von

$$P_1 = \sum_{zz} S = 450 \text{ Nm}^{-2} \cdot 5 \times 10^7 \text{ m}^2 = 2.28 \times 10^6 \text{ t}$$

belastet würde.

Da jedoch auch der Luftdruck im Hohlraumsystem der oberen Sohle um 4.5 mbar vermindert wird, reduzieren sich die der Last des darüberlagernden Gebirges entgegenwirkenden Kräfte noch einmal um den gleichen Betrag: das Deckgebirge über der oberen Sohle sinkt um einen weiteren, hier als vergleichbar groß angesehenen Betrag nach unten. Der Gesamteffekt würde auch durch eine Deckgebirgsbelastung von

$$F_2 = 2 P_1 = 4.56 \times 10^6 t$$

bewirkt.

Diese Menge Salzgestein müßte innerhalb von 30 - 40 Minuten auf die Erdoberfläche über dem 10×10 km² großen Baufeld aufgebracht und gleichmäßig verteilt werden, um Senkungsbewegungen des Deckgebirges bzw. Pfeilerdeformationen von gleicher Größe wie der Luftdruckeffekt zu bewirken.

Im Werrakalirevier sind die Baufelder größer, das Verhältnis von Hohlraumgrundfläche zu Pfeilergrundfläche dagegen etwas kleiner als beim vorliegenden Rechenbeispiel.

3. Anwendungsmöglichkeiten

Die im Abschnitt 2.2 beschriebene Meßanordnung von je einem Gezeitenklinometer zu beiden Seiten des Pfeilers erfaßt neben den luftdruckbedingten Effekten auch die klinometrischen Wirkungen aller übrigen Pfeilerbelastungsänderungen.

Unter diesen Effekten sind die im Zusammenhange mit CO₂ – Ausbrüchen oder lokalen seismischen Ereignissen auftretenden sprunghaften Pfeilerbelastungsänderungen von besonderem Interesse, denn wenn nach einem solchen Ereignis von den verantwortlichen Markscheidern und Ingenieuren die weitere Abbauführung festgelegt wird, benötigt man als Entscheidungshilfe geophysikalische Meßdaten.

Das lokale seismische Überwachungssystem liefert für diese Zwecke erste Angaben über Herdzeit, Herdlage, Magnitude und Herdflächenorientierung. Doch es würde die Arbeit der Verantwortlichen wesentlich erleichtern, wenn zusammen mit den seismischen Meßdaten auch Informationen über die durch das Ereignis bewirkten Pfeilerbelastungsänderungen und deren Verteilung im Grubenfeld bereitgestellt werden könnten.

Für diese Zwecke sind die herkömmlichen Meßverfahren wie z.B. die Entlastungsmethode (Meßstiftmethode) oder die Druckaufbaumethode (DREYER (1975)) wegen ihrer langen Meßzeiten nicht geeignet.

Beim o.g. klinometrischen Meßverfahren hängt die Meßzeit praktisch nur von den Schwingungseigenschaften (Dämpfung) des Meßsystems ab. Mit den üblichen Kunstgriffen (Filterung, Mikrorechneranschluß) müßte es möglich sein, die Meßergebnisse annähernd zeitgleich mit den Resultaten der seismischen Überwachung bereitzustellen.

Das vorgeschlagene Verfahren benutzt als Eichsignal für die Umrechnung der am Meßplatz registrierten Neigungsvariationen in Pfeilerbelastungsänderungen den am gleichen Pfeiler gemessenen barometrischen Belastungseffekt.

Denn gemäß Abschnitt 2.7 ist die der künstlichen Luftdruckverminderung im untertägigen Hohlraumsytem entsprechende Deckgebirgsbelastung berechenbar, wobei die Rechengenauigkeit im Vergleich zur o.g. ersten Abschätzung bei Berücksichtigung der tatsächlichen Hohlraumverteilung (Grubenriß) bzw. durch Einrichtung weiterer Luftdruckmeßstellen erheblich gesteigert werden kann. Dabei läßt die Weitspannigkeit der Bewegung, für die u.a. die Meßergebnisse der Station STL sprechen, eine Verwendung von regionalen Durchschnittswerten für die Änderungen des Pfeilerbelastungsdruckes durchaus zu.

Werden im Grubenfeld mehrere klinometrische Meßstellen dieser Art eingerichtet, so sind in Abhängigkeit von der Magnitude des Ereignisses oder vom Umfang des CO₂ -Ausbruches auch Angaben über die regionale Verteilung der Pfeilerbelastungsänderungen im Grubenfeld möglich.

Wegen der hohen Auflösung der Gezeitenklinometer von 2 × 10⁻⁴" lassen sich noch Änderungen des Pfeilerbelastungsdruckes in der Größenordnung von 10 N m-² meßtechnisch erfassen. Das ist wenig im Vergleich zu den Belastungsänderungen, die infolge der normalen Gewinnungsarbeiten (Sprengarbeiten am Schichtende) täglich an den Pfeilern der Abbauumgebung auftreten.

Infolgedessen kann man ein großes Grubenfeld mit einem verhältnismäßig weitmaschigen Netz von Klinometermeßstellen überwachen.

Der übergang vom Dehnungsmeßstreifen (Entlastungsmethode) zum Gezeitenklinometer als Sensor für die belastungsbedingten Verformungen des Salzgebirges brachte jedoch auch einige zusätzliche Meßprobleme:

 Klinometerregistrierungen in untertägigen Hohlräumen entnasten neben den Wirkungen der Pfeilerbelastungsänderungen auch regionale Neigungskomponenten, im Werragebiet z.T. auch infolge des 2-Sohlenabbaus.

Die regionalen Neigungskomponenten haben zu beiden Selten des Pfeilers das gleiche Vorzeichen. Mit Hilfe der o.g. Meßanordnung von je einem Gezeitenklinometer zu beiden Seiten des Pfeilers wird eine saubere Eliminierung dieser Neigungskomponenten erreicht.

 Die Materialeigenschaften sowie die kleintektonische Struktur des Salzgebirges (Haarrisse, Sprengrisse, Schnitte, Hohlräume, tektonische Störungen) beeinflussen die Beträge der gemessenen belastungsbedingten Neigungen.

Der Einfluß dieser Fehlerquellen wird beim vorgeschlagenen Meßverfahren dadurch eliminiert, daß die gemessenen Neigungseffekte mit nichtbarometrischen Ursachen auf die in gleicher Weise durch die Materialeigenschaften und die Struktur des Salzgebirges beeinflußten Wirkungen luftdruckbedingter Pfeilerbelastungsänderungen normiert werden. Es kommt in diesem Zusammenhang lediglich darauf an, den Meßeffekt durch geeignete Wahl der Meßplätze am Pfeiler so groß wie möglich zu machen, um ein günstiges Signal/Noise-Verhältnis zu erreichen.

3. Bei lokalen seismischen Ereignissen, CO₂ -Ausbrüchen und natürlich auch im Zusammenhang mit den normalen Gewinnungsarbeiten werden die Gezeitenklinometer als schwingungsfähige Systeme zu Eigenschwingungen angeregt. Dabei kann es besonders an den Klemmstellen der Aufhängefäden von Pendelklinometern zu starken Beanspruchungen kommen, die zu gerätebedingten Sprüngen der Anzeige führen.

Zur Lösung des Problems wird empfohlen, anstelle der im Abschnitt beschriebenen OSTROVSKIJ-Klinometer Niveauvariometer einzusetzen. Denn diese Geräte sind von solchen Fehlern

weitgehend frei. Nach Abklingen der Eigenschwingungen stellt sich die Flüssigkeitssäule des Niveauvariometers in die neue Gleichgewichtslage ein.

Auch aus einem anderen Grunde ist die Verwendung von Niveauvariometern für derartige Messungen zu empfehlen. Befindet sich die Meßstelle in Abbaunähe bzw. in Herdnähe des seismischen Ereignisses oder CD₂ -Ausbruches, so können infolge der Beanspruchung des Salzgebirges durch das Ereignis im Bereiche des Meßplatzes Risse in der Sohle entstehen bzw. vorhandene Sprengrisse oder Schnitte sich erweitern , wodurch bei den kurzbasigen Pendelklinometern (OSTROVSKIJ-Pendel: Meßbasis 0.22 m) erhebliche Meßwertverfälschungen durch straininduzierte Zusatzneigungen (HARRISON (1976) entstehen können. Werden stattdessen langbasige Niveauvariometer als Sensoren verwendet , so lassen sich diese Verfälschungen weitgehend vermeiden. Abb. 12 erläutert, wie bei Berücksichtigung aller dieser Anforderungen die Meßstelle ungefähr aussehen sollte.

Die beiden 10-m-langen Niveauvariometer (Schlauchwaagen mit kapazitivem Meßwertabgriff) messen wiederum im gleichen Azimut senkrecht zum Pfeilerstoß. Ihre Endbolzen wurden

in Streckenmitte in die Sohle

- in Sohlenhöhe etwa 1 m tief in den Pfeilerstoß

einzementiert.

Von den hier genannten Meßproblemen stellte das dritte die größte Hürde für die Anwendung des klinometrischen Meßverfahrens im Bergbau dar. Erst seit wenigen Jahren gibt es Meßgeräte, die den gestellten Anforderungen entsprechen. So haben ZUERN und JENSCH (1985) für Gezeitenbeobachtungen eine Schlauchwaage mit kapazitivem Meßwertabgriff entwickelt, der man auch in der Ingenieurgeophysik (Bauwesen, Bergbau) eine größe Zukunft vorhersagen kann.

In der Arbeit SIMON/NEUMEYER (1987) werden weitere Niveauvariometertypen beschrieben.

Literaturverzeichnis

- DREYER, W.: Gebirgsmechanik im Salz. Stuttgart, Enke-Verlag, 1975.
- FARRELL, W.E.: Deformation of the Earth by Surface Loads. Rev. Geophys. Space Phys., 10, 1972, 761-797.
- FRANK, PH., R. v.MISES: Die Differential- und Integralgleichungen der Mechanik und Physik, Bd. II. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1961.
- GIMM, (Hrsg.): Kali- und Steinsalzbergbau, Bd. I, Leipzig, VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, 1969.
- HARRISON, J.C.: Cavity and Topographic Effects in Tilt and Strain Measurements. Geophys. Res., Vol. 81(1976) 319-328.
- KNOLL, P.: Die Energiebilanz von Gebirgsschlägen, ein Mittel zur Bestimmung ihres geomechanischen Mechanismus. Neue Bergbautechnik 7 (1981) 384-389.
- LAMB, H.: On Boussinesq's Problem. Proc. London Math. Soc. 34 (1902) 276-284
- LECOLAZET, R.; Sur la reconstitution des observations par interpolation. Comm. Obs. Roy. Belg., Ser. Geoph. 184 (1961).
- SIMON, D., H. HARWARDT: On the strain movements at the Tiefenort station 1977 - 1986. Paper, IUGG general assembly, Vancouver 1987, Gerl. Beitr., 5(1988).
- SIMON, D., J. NEUMEYER: Untersuchungen (Vorbereitungen) zur Entwicklung eines Niveauvariometers. Studie. ZIPE Potsdam, (1987).
- TERAZAWA, K.: On periodic disturbances of level arising from the load of neighbouring oceanic tides. Proc. London Phil. Soc., Vol. 217 (1916) 35-50.
- UHLMANN, M.: Über die Erkundung der Spannungsverhältnisse in Stützpfeilern des Kali- und Steinsalzbergbaus auf akustischer Basis. Freib. Forschungsheft C 36 (1957).
- ZUERN, W., H. JENSCH, u.a.: The Horsefall Tiltmeter. Proc. of the 10th Int. Symp. on Earth Tides, Madrid, 1985

17

.



Abb. 1 Lageplan der Station Tiefenort mit den 35 Klinometermeßstellen



Abb. 2 Lageplan der Station Stadtlengsfeld mit den Grenzen der Fluchtkammer (Gasschutzkammer) und dem Klinometerprofil



Abb. 3 Meßbeispiel von Tiefenort vom 17./18.4.1978



Meßbeispiel von Tiefenort vom 28.4.-8.5.1978 4





Abb. 6 Meßbeispiel von Stadtlengsfeld vom 15./16.1.1979



Abb. 7 Amplitudenabhäng verursachten Lu

verursachten Luftdruckvariation vom Abstand zum ausziehenden Schacht





Abb. 8 Formvergleich der normierten Luftdrucksignale



in den ersten 10 Minuten nach Lüfterschaltung



Abb. 10 Karte der auf eine Luftdruckänderung von 1 mbar normierten Neigungsänderungen



