

Photogrammetrische Deformationsmessungen an bergmännischen Verbaueinrichtungen

=====

H. Muck / G. Wittmann

Die numerische Auswertung (Bündellösung) terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahmen erlaubt Aufnahmedispositionen, die bei analogen Verfahren (stereoskopische Betrachtung) nicht vorstellbar sind. Zur Durchführung bergmännischer Verbaubeobachtungen (vergleichbar: Tunnelquerschnittprofile) wird mit um ca. 200 gon entgegengesetzten Aufnahmerichtungen gearbeitet (dazu sind transparente oder kugelförmige Vermarkungen erforderlich). Beim vorliegenden Objekt kommt es so zu gleichmäßig günstigen Strahlenschnitten von ca. 100 gon. Durch Einführung von Streckenänderungen (Distometer ISETH) statt Paßpunkten als geodätische Stützinformationen bei Wiederholungsmessungen werden letztlich Genauigkeiten von $2 \cdot 10^{-5}$ in allen Koordinatenrichtungen erreicht.

Auf einer über Tage befindlichen Versuchsstrecke des Steinkohlenbergbauvereins (vgl. Bild 1 und 2) sollten die Einwirkungen des durch künstliche Pressen imitierten Gebirgsdrucks auf einen bergmännischen Stahlverbau untersucht werden. Die Zahl von 60 zu bestimmenden Einzelpunkten und die durch den zeitlichen Ablauf der Deformationen sich ergebende Forderung nach möglichst gleichzeitiger Durchführung der Beobachtungen für einzelne "Lastfälle" legten es nahe, die Messungen photogrammetrisch vorzunehmen. Die Auswertung der Aufnahmen konnte numerisch (Bündellösung) erfolgen.

Die örtlich beengten Verhältnisse (Tunnel) ließen stark konvergente Aufnahmen nicht zu. Um dennoch zu geometrisch günstigen räumlichen Schnitten der Projektionsstrahlen zu kommen, wurde die in Bild 3 dargestellte Aufnahmekonstellation gewählt. Die in Grund- und Aufriß etwa gegeneinander gerichteten Aufnahmeachsen unterstreichen die Vorteile numerischer Auswertung besonders: während bei analog-stereoskopischer Auswertung die ungefähre Parallelität der Aufnahmen das Aufnahmekonzept festlegt, kann bei numerischer Auswertung die für die Genauigkeit maßgebliche Geometrie der räumlichen Strahlenschnitte als entscheidender Gesichtspunkt Berücksichtigung finden. So konnten bei der vorliegenden Objektform (etwa Halbkreis in Vertikalebene) bei entsprechender Wahl der Aufnahmestandpunkte durchwegs nahezu ideale Strahlenschnitte von circa 100 gon erreicht werden.

Hauptschwierigkeit bei der praktischen Durchführung der Aufgabe war die Wahl geeigneter Vermarkungen, die von beiden Aufnahmeseiten identisch sein sollten. Unter diesem Gesichtspunkt kamen sowohl Kugeln als auch Plättchen mit Bohrungen in Frage. Im Zusammenhang mit der künstlichen Beleuchtung für die Aufnahmen (Möglichkeiten: Strahler oder Blitz) führen beide Vermarkungsformen zu systematischen Einstellungsfehlern bei der Komparatorauswertung: Kugeln (auch wenn sie dunkel, mattiert oder in der Oberfläche aufgeraut sind) werden nicht gleichmäßig ausgeleuchtet bzw. reflektieren das Licht (je nach Stand der Beleuchtungseinrichtung) nicht zentrisch. Im Rahmen der angestrebten Komparatormeßgenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ kommt es so zu subjektiven Einstellfehlern. Einen ähnlichen Effekt bewirkt die zweite der genannten Vermarkungsformen. Die zylindrische Seitenfläche der Bohrung führt je nach Aufnahme- und Ausleuchtung zu einer scheinbaren Verschiebung des Vermarkungszentrums. Trotzdem wurde dieser Vermarkungstyp gewählt. Um den genannten Fehlereinfluß gering zu halten,



Bild 1: Prüfbahn mit Belastungseinrichtung für Ausbaubögen (Außenansicht)



Bild 2:
Prüfbahn mit Belastungseinrichtung für Ausbaubögen (Innenansicht)

wurden die Plättchen zum Vermarkungszentrum (Bohrung) hin konisch nachgebohrt. Wegen der geänderten Oberflächenneigungen führt dies jedoch wieder zu verschiedenen Abstufungen in der Grautönung im Bild, die - z. T. auch wegen Überstrahlungen - bei der stark vergrößerten Betrachtung im Komparator nicht mehr scharf getrennt werden können. Abgesehen von diesen Schwierigkeiten, die nur beim Ausschöpfen der höchsten Präzision wirksam werden, erwies sich diese gewählte Vermarkungsform als einfach und billig. Die Bohrungen hoben sich aufgrund des dunkleren Hintergrundes von der weißen Oberfläche der Vermarkungsplättchen ausreichend ab.

Die geodätische Grundlagenmessung (üblicherweise als Paßpunktbestimmungen) wurde ausschließlich in Form sog. "zusätzlicher terrestrischer Messungen" vorgenommen. So wurden zwischen 4 ausgewählten Punkten (siehe Bild 4) mittels Invardrähten (Distometer ISETH) die Streckenänderungen von Laststufe zu Laststufe ermittelt. Da diese Messungen alle in der Ebene des zu beobachtenden Bogens liegen, dieser aber auch in Aufnahme­richtung kippen konnte, wurden zwischen zusätzlichen Bodenpunkten Höhenänderungen nivellitisch beobachtet. Dazu wurden - nahezu bodengleich - Bolzen geschlagen, auf denen einerseits Nivellierlaten aufgehoben werden konnten, die aber andererseits an ihrem höchsten Punkt eine kleine Bohrung hatten, um als Punktidentifikation für die photogrammetrischen Aufnahmen eine Kugel von 4mm Durchmesser in reproduzierbarer Lage aufnehmen zu können (vgl. Bild 5).

Ausgehend von einer beliebig angenommenen (jedoch den tatsächlichen örtlichen Verhältnissen ungefähr entsprechenden) "Nullmessung" sollte durch Verwendung dieser Strecken- und Höhenänderungen die geodätische Grundlage für die weiteren drei Lastfälle zur Verfügung stehen. Sie wurden jeweils als ursprüngliche Messungen in die photogrammetrisch-numerische Punktausgleichung eingegeben. Die Genauigkeit der geodätischen Grundlage konnte mit $\pm 0,7 \left[\frac{1}{10} \text{ mm} \right]$ angenommen werden.

Die Auswertungen der Messungen wurden an einem PK 1 von ZEISS durchgeführt. Neben den Vorteilen einer schnellen Messung und einer für die spätere Weiterverarbeitung zweckmäßigen Datenregistrierung bietet dieses Gerät eine außerordentliche Präzision: Bildkoordinatengenauigkeiten von $\leq \pm 2 \mu\text{m}$ können erreicht werden. Als Monokomparator führt er insbesondere dann zu günstigen Ergebnissen, wenn - wie bei der vorliegenden

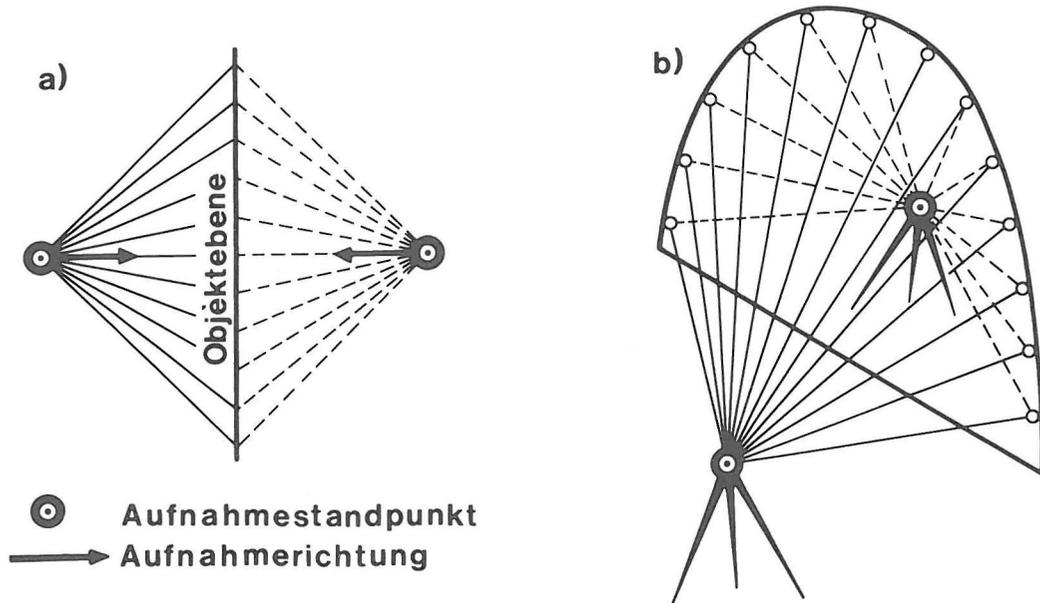


Bild 3: Aufnahmegeometrie. a) Grundriß b) Räumliche Darstellung

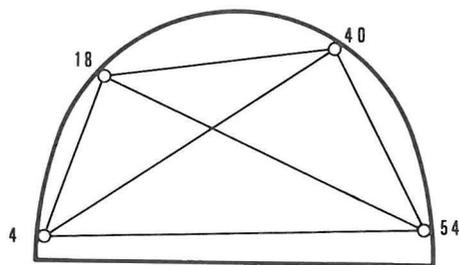


Bild 4:

Darstellung der mit dem Distometer ISETH gemessenen Strecken (-änderungen)

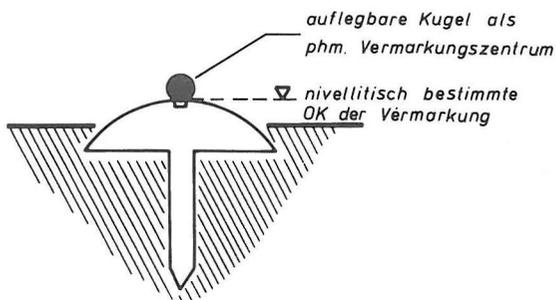


Bild 5:

Vermarkungsform der Bodenpunkte

Bündelberechnung - das Einzelbild Grundlage der Auswertung ist. Die numerische Auswertung der Aufnahmen wurde mit dem Bündelausgleichungsprogramm TERBES (vgl. WITTMANN /3/) durchgeführt. Die dort gefaßte Möglichkeit der gemeinsamen Verarbeitung photogrammetrischer Messungen und geodätischer Zusatzinformationen im Objektraum kann bei dem vorliegenden Anwendungs-Beispiel genutzt werden. Die Berechnungen wurden auf der Anlage CYBER 72/76 des Rechenzentrums der Universität Köln vorgenommen.

Die Genauigkeit der nach dem dargelegten Schema ausgewerteten Aufnahmen beträgt für die in der primär interessierenden Objektebene liegenden Koordinatenkomponenten $\pm 0,7$ bis $\pm 1,2 \left[\frac{1}{10} \text{ mm} \right]$. Sie konnten mit den Ergebnissen eines unabhängigen geodätischen Pfeilhöhenverfahrens (durchgeführt von der ETH Zürich) verglichen werden. Die in Aufnahmerichtung liegende Komponente der Objektpunkte ist aufgrund der einwandfreien Strahlenschnitte kaum weniger genau. Wegen der nachfolgend unter 3) genannten Unzulänglichkeiten trifft dies jedoch nicht mehr für alle Aufnahmen zu.

Einige Detail-Probleme erschwerten die Auswertung der Aufnahmen:

- 1) Die innere Orientierung der verwendeten UMK von JENOPTIK war für die Focuseinstellung 5 m nicht kalibriert. Deshalb wurde die Bündelberechnung lediglich mit grob angenommenen, dann aber als konstant angehaltenen Werten der inneren Orientierung durchgeführt. Tatsächliche Abweichungen hiervon schlagen sich in den Parametern der äußeren Orientierung nieder. Werden Konvergenzaufnahmen vermieden, bleibt diese Vorgehensweise (hier: Objekt in nahezu einer Ebene senkrecht zur Aufnahmerichtung) ohne negative Auswirkung auf die Genauigkeit des Endergebnisses.
- 2) Die Versuchsreihe dauerte einen ganzen Tag. Zumal die Kammer mehrfach gewechselt wurden (auch probeweiser Einsatz der TMK von ZEISS und P 32 von WILD) konnte die Lage der Projektionszentren nicht als konstant angesehen werden. In der Auswirkung entsprach dies dem unter 1) genannten Gedanken.
- 3) Die Tiefenschärfe der Aufnahmen (Aufnahmeentfernung 5 m) ist so gering, daß die vor und hinter der eigentlichen Objektebene vermarkten Nivellementspunkte nicht mehr wünschenswert scharf abgebildet werden. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit ihrer Auswertung im Komparator ist deutlich geringer als die anderer Objektpunkte. Eine bessere Ausleuchtung der Aufnahmen (Elektronenblitz statt Strahlern) würde ein stärkeres Abblenden erlauben und somit diesen Mangel teilweise beseitigen.
- 4) Die Streckenmessung (Diagonalenviereck) wurde ausgeglichen. Die daraus resultierende Genauigkeit von $\pm 0,7 \left[\frac{1}{10} \text{ mm} \right]$ ist geringer als erwartet. Die Strecken können somit in Relation zur Photogrammetrie nicht als "fehlerfrei" angesehen werden.

Die Eigenart der Aufnahmegeometrie, die ausschließliche Verwendung terrestrischer Zusatzinformationen im Objektraum statt Paßpunkten sowie die außerordentliche Präzision der Ergebnisse bestätigen nochmals die Überlegenheit numerischer Auswerteverfahren bei vielen Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie. Nur geodätische Messungen höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit sind der Qualität photogrammetrischer Auswertungen ebenbürtig. Statt - wie im vorliegenden Beispiel - Längen- und Höhenänderungen mechanisch bzw. nivellitisch zu messen, bietet sich z. B. auch der Einsatz elektrischer Meßwertgeber in Kombination mit photogrammetrischen Messungen an. Der hier eingeschlagene Lösungsweg, den auch HELL /2/ empfiehlt und fingiert untersucht, dürfte auch wesentlich zur Verbesserung des von GRUMPELT /1/ aufgegriffenen Problems der Deformationsmessungen in Tunnelröhren beitragen. Hauptaugenmerk ist dabei auf die geschickte Kombination geodätischer und photogrammetrischer Meßelemente zu legen. Zweckmäßig wird die Aufnahmekamera unter dem Gesichtspunkt des geodätischen Theodoliten eingesetzt - mit dem Vorteil, daß viele Richtungen gleichzeitig gemessen werden können.

- /1/ GRUMPELT, H. Ein analytisches Verfahren der Bündelverknüpfung in der Nahbildmessung, angewandt auf Deformationsmessungen an einer Tunnelröhre im Bergbauggebiet.
DGK, Reihe C, Heft 189, München 1973
- /2/ HELL, G. Ein Beitrag zur terrestrischen Bildtriangulation.
Sonderdruck aus der Festschrift Kurt Schwidofsky, 1975
- /3/ WITTMANN, G. Untersuchungen zur photogrammetrischen Durchführung bergschadenkundlicher Messungen.
Aachen, 1979