

# Aerophotogrammetrische Präzisionsvermessung von Punktverschiebungen in Braunkohlen-Tagebaugebieten

Von Klaus Reichenbach, Köln

## 1. Zweck der Untersuchungen

Innerhalb des Städtedreiecks Köln - Düsseldorf - Aachen liegt das größte zusammenhängende Braunkohlenvorkommen Europas (Abb. 1).

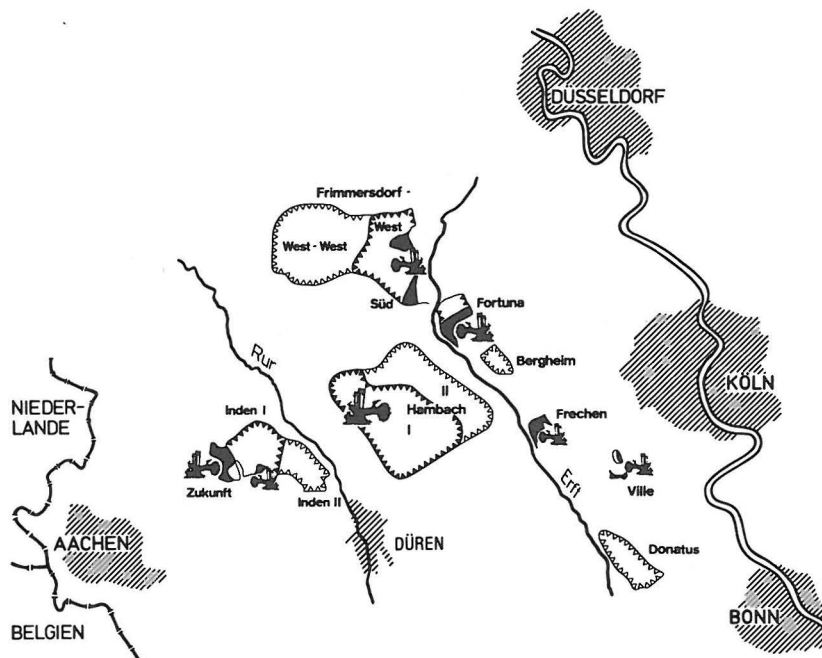


Abbildung 1

Das Rheinische Braunkohlenrevier trägt mit über 110 Mio Jahrestonnen Braunkohlenförderung wesentlich zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland bei. Die regelmäßigen marksscheiderischen Arbeiten für die Vermessung und Darstellung der ausgedehnten Tagebaubetriebe der Rheinische Braunkohlenwerke AG (Rheinbraun) erfolgen seit rund 20 Jahren zu einem großen Teil mit Hilfe der Aerophotogrammetrie [3]. Sie wurde von Anfang an mit digitaler Auswertung und EDV betrieben, da außer den Kartierungen auch Volumenberechnungen erforderlich sind. Heute ist sie in Verbindung mit modernen terrestrischen Meßverfahren, Datenfernübertragung und digitalen Gelände- und Tagebaumodellen integraler Bestandteil eines flexiblen und leistungsfähigen Systems der Tagebauvermessung (Abb. 2) [6].

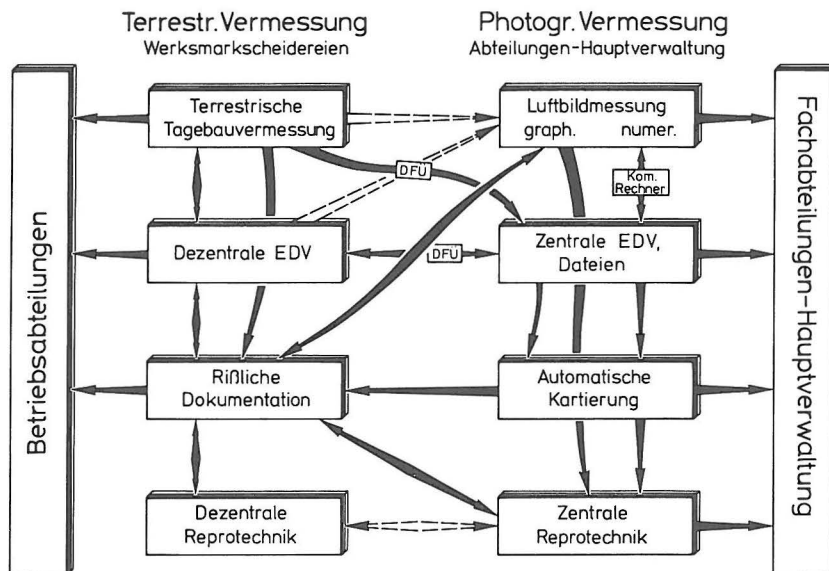


Abbildung 2

Der Abbau von Deckgebirge und Kohle bis zu Tiefen von mehreren 100 m beeinflusst das erdstatische Gleichgewicht. Bodenbewegungen am Tagebaurand sind die Folge. Diese sehr langsamen Bewegungen sind teilweise auch noch in einiger Entfernung vom Tagebaurand, im wesentlichen als Lageverschiebungen, feststellbar. Sie müssen durch geodätische Deformationsmessungen in mehr oder weniger kurzen Perioden beobachtet werden. Der terrestrische Meßaufwand ist wegen der Größe der zu beobachtenden Flächen ungewöhnlich hoch [5]. Die Ergebnisse des Projektes Appenweier [1] und die neuen Möglichkeiten der Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung [2] ermutigten zu der Hoffnung, daß die Photogrammetrie eine wirtschaftliche Alternative bieten könnte. Deshalb begannen Anfang 1979 kontrollierte Versuche zur Erfassung von Festpunkt-Lageänderungen in einem Bodenbewegungstestfeld.

## 2. Versuchsplanung

Als Versuchsgebiet wurde eine Tagebaurandzone ausgewählt, in der schon seit einiger Zeit terrestrische Bodenbewegungsmessungen stattfinden, um den Bewegungsablauf und seinen Zusammenhang mit geologischen Gegebenheiten und dem Betriebsgeschehen zu untersuchen. Es handelt sich um eine rund 1 km x 3 km große Fläche mit überwiegend landwirtschaftlicher Nutzung. Die Bewegungen liegen je nach Entfernung vom Tagebaurand zwischen 0 und 2 cm je Monat. Die zu erwartende photogrammetrische Lagemeßgenauigkeit von 3 cm bei Bildmaßstäben um 1:8000 ließ den Schluß zu, daß die Bewegungen eines Vierteljahres aus wiederholten Luftbildauswertungen nachweisbar sein müßten. Da auch die terrestrisch-geodätischen Bodenbewegungsmessungen der zuständigen Betriebsmarkscheiderei etwa vierteljährlich erfolgen, bot sich die gleichzeitige Anwendung beider Verfahren an.

Innerhalb des Versuchsgebietes liegt ein Feld von 24 Kontrollpunkten, die auch Verknüpfungspunkte darstellen und ungefähr ringförmig von 29 Paßpunkten umgeben sind (Abb. 3). Dieser "Paßpunktring" wird allerdings am Tagebaurand durch nur einen Punkt geschlossen, der um die doppelte Basislänge von den übrigen Paßpunkten entfernt ist.

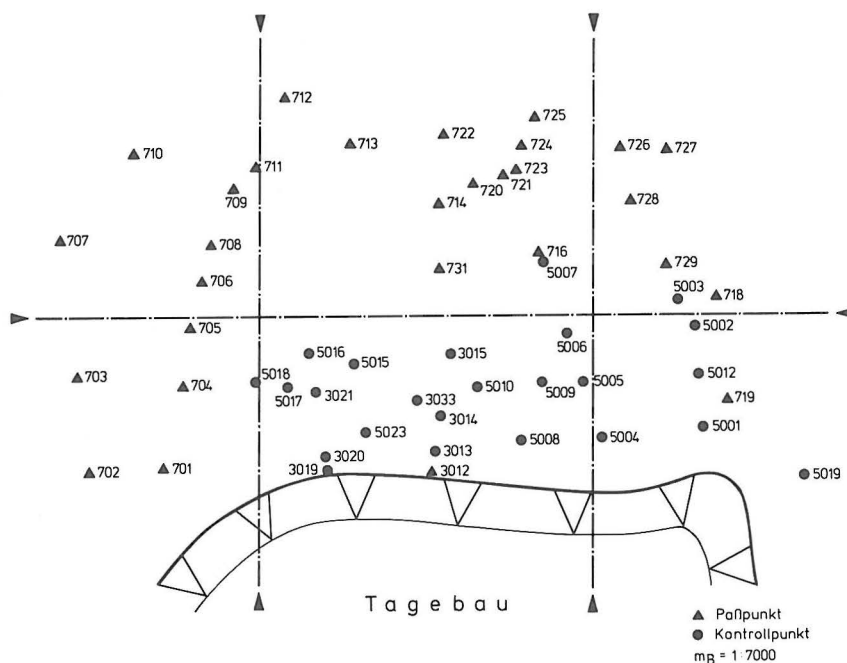


Abbildung 3

Kontroll- und Paßpunkte wurden zu jeder Befliegung signalisiert. Die Signalgröße ist auf die Bildmaßstäbe 1:7000, 1:8000 und 1:3000 abgestimmt, und zwar unter Berücksichtigung des Meßmarkendurchmessers des Stereokartiergerätes Zeiss Planimat D 2; dieses hat von den zur Auswertung benutzten Geräten die größte Meßmarke. Das Punktfeld wurde jeweils außerhalb des sich verändernden Gebietes angeschlossen. Die Lagegenauigkeit wird von der zuständigen Betriebsmarkscheiderei mit 1 cm angegeben; sie reicht also für eine zuverlässige Kontrolle der photogrammetrischen Meßergebnisse aus.

### 3. Bildflüge

Abb. 3 zeigt die Streifenlagen für die Bildflüge im Maßstab 1:7000, die mit Zeiss Weitwinkelkamern als Vierfach-Befliegungen erfolgten (gekreuzte und gegenparallele Flugachsen). Im Rahmen des Versuchsprogramms, das bisher drei Beobachtungsperioden von je drei bis fünf Monaten Dauer umfaßt, fanden vier Befliegungen statt (Tabelle 1). Für den ersten Flugtermin wurde noch der Bildmaßstab 1:8000 gewählt und das Gebiet zusätzlich in zwei Einfach-Streifen im Maßstab 1:3000 aufgenommen.

Diese beiden Bildmaßstäbe und Streifenlagen der ersten Befliegung ergeben jeweils etwa 16 Modelle, so daß der Meßaufwand im Auswertegerät ungefähr gleich hoch anzusetzen war. Es ging bei dem großen

Bildmaßstab um die Frage, ob mit dem Zeiss Planimat bei Minimierung des Flugaufwandes und max. dreifacher Punktverknüpfung die geforderte Lagemeßgenauigkeit von  $< 3$  cm erreicht werden könnte. Der Vergleich der Meßergebnisse aus den Maßstäben 1:3000 und 1:8000 (Abschnitt 5) führte dann zur Wahl des Bildmaßstabes 1:7000.

Da die Befliegungen zu allen Jahreszeiten stattfanden und wegen der Terminbindung nicht immer die günstigsten Aufnahmebedingungen abgewartet werden konnten, ergaben sich merkliche Unterschiede der Bildqualität. Allerdings konnten diese durch sorgfältige, sensitometrisch kontrollierte Kontraststeuerung bei der Fliegerfilmentwicklung in erträglichen Grenzen gehalten werden. Interessanterweise lieferte gerade der Film mit dem geringsten Kontrastumfang vom Dezember 1979 ( $\log DU \approx 1,0$ ) die besten Meßergebnisse vor der Ausgleichung. Das zeigt, daß gut signalisierte Meßpunkte bei geringem Kontrast u. U. genauer angefahren werden können als bei höherem Kontrast mit der Gefahr von Signalüberstrahlungen.

#### 4. Auswertungen und Blockausgleichungen

Durch die gezielte Kontraststeuerung bei der Filmentwicklung entstanden gut auswertbare Negative, so daß man auf den Umweg über Diapositiv verzichten konnte. Zur Vorbereitung der Aerotriangulation wurden außer den rd. 60 verknüpfenden Paß- und Kontrollpunkten bis zu 56 zusätzliche natürliche Verknüpfungspunkte ausgesucht. Die Auswertung aller Bildflüge erfolgte im Zeiss Planimat lage- und höhenmäßig in relativ orientierten Modellen mit zweifachem Aufsetzen der Meßmarke aus gegenüberliegenden Richtungen (Tabelle 1). Planicomp-Auswertungen fanden für Periode II und monoskopische PSK-Messungen für die zusammengefaßten Perioden II + III statt. Durch die Mehrfachüberdeckungen der Bildverbände ergaben sich bis zu 11-fache Punktverknüpfungen. Die Planimat und PSK-Auswertungen wurden von demselben erfahrenen Operateur (A) durchgeführt. Lediglich die Planicomp-Messungen oblagen einem mit dem Gerät und mit den örtlichen Bedingungen weniger vertrauten Auswerter (B), der im übrigen die Meßmarke nur jeweils einmal, wenn auch immer aus derselben Richtung auf die Bildpunkte setzte; so können diese Ergebnisse nicht ganz befriedigen. Sicher spielten dafür auch die Okularvergrößerungen eine Rolle, die für Planimat und Planicomp 8-fach waren und beim Komparator 12- und 16-fach. Eine 12-fache Vergrößerung im Planicomp und der Einsatz des Operateurs (A) hätten zu etwas besseren Ergebnissen geführt.

Für die Blockausgleichungen dienten das bei Rheinbraun auf einer Großrechenanlage installierte Programm PAT-M 43 und das Programm PAT-B mit Selbstkalibrierung des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart [4].

## 5. Ergebnisse der Blockausgleichungen

Das Ziel der Untersuchungen ist, festzustellen, welches Verfahren beim Routineeinsatz die besten Ergebnisse für die Ermittlung von Größe und Richtung der Punktverschiebungsvektoren im Tagebaurandbereich verspricht. Ferner ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu prüfen, welche Genauigkeiten ein ohnehin vorhandenes Analog-Stereokartiergerät (Planimat) äußerstenfalls liefern kann. Deshalb sollte man die Versuchsergebnisse primär unter Praxisaspekten diskutieren. Zusätzliche Analysen, z. B. von Ausgleichungsvarianten mit nur 2-facher Blocküberdeckung, sind demnächst vorgesehen (Nach Klein [4] verbesserte eine 4-fach-Überdeckung die Genauigkeit nicht, wenn sie bei 2-facher Überdeckung schon in der Nähe der Paßpunktgenauigkeit liegt). Wegen einer örtlichen Unstimmigkeit im Paßpunktfeld und zur Reduzierung der Punktanzahl sind noch Neuberechnungen mit verschiedenen Paßpunktversionen beabsichtigt. Auch ein Wirtschaftlichkeitsvergleich der terrestrischen und aerophotogrammetrischen Bodenbewegungsmessung steht noch aus.

Trotz dieser Einschränkungen läßt sich aber anhand der in Tabelle 2 zusammengestellten Ergebnisse der Blockausgleichungen folgendes feststellen:

1. Bei gleichbleibender Blockgeometrie ergeben sich deutliche Genauigkeitsunterschiede, die geräte- und z. T. auswerterabhängig sind.
2. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Bildmaßstäben 1:3000 (einfache Streifen) und 1:8000 (gekreuzt und gegenparallel) fällt zu Gunsten des kleineren Maßstabes aus. Allerdings entsprachen die Fehler  $\sigma_0 \approx 6$  cm und  $m_{x/y} \approx 5$  cm nicht den Erwartungen; deshalb wurde für die folgenden Bildflüge  $m_b = 7000$  gewählt.
3. Der Planimat lieferte aus der Befliegung am 4.12.79 mit knapp 4  $\mu$ m eine zunächst nicht erwartete Meßgenauigkeit. Hauptursache ist neben der meßmarkengerechten Signalisierung die bis zu 11-fache Verknüpfung der Kontrollpunkte. Die Koordinatengenauigkeit nähert sich mit rd. 3 cm dem gewünschten Wert.
4. Aus den bereits in Abschnitt 4 genannten Gründen übertreffen die Planicom-Resultate die des Planimaten nur wenig. Auch wegen der Kürze der Beobachtungsperiode II (3 Monate) waren bei einigen Kontrollpunkten die gemessenen Veränderungen nicht mit den relativ kleinen tatsächlichen Bewegungen im Einklang, sonder z. T. sogar gegenläufig.
5. Die Komparator-Messungen sind wie erwartet die genauesten, auch ohne Selbstkalibrierung.

6. Die Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung der PSK-Messungen durch 12 Zusatzparameter bringt eine sehr deutliche weitere Verbesserung: Genauigkeit der Kontrollpunkte ist wie beim Projekt Appenweier [4] 2 cm.
7. Wichtigstes Ergebnis der PSK-Messungen mit Selbstkalibrierung ist der mittlere Koordinatenfehler der Kontrollpunkte, der jeweils unter 2 cm liegt. Der max. Koordinatenfehler beträgt 4,7 cm.

Einen weitergehenden Vergleich der PSK-Auswertungen erlaubt die Tabelle 3, in der zwei Paßpunktversionen und die mittleren Fehler der Bildpunkte und Kontrollpunkte sowie die mittleren Verbesserungen an den Paßpunkten getrennt dargestellt sind. Die Paßpunktversion b) enthält einen zusätzlichen Punkt am Tagebaurand und weniger Paßpunkte im übrigen Teil des Paßpunkttringes. Gegenüber der Version a) mit nur einem Punkt am Tagebaurand bringt b) ohne Selbstkalibrierung eine gewisse Verbesserung der Kontrollpunktkoordinaten, mit Selbstkalibrierung aber nicht. Sigmanull bleibt in beiden Fällen unverändert. In der Praxis wird sich deshalb der zusätzliche Aufwand für die Bestimmung eines weiteren Paßpunktes am Tagebaurand nicht lohnen.

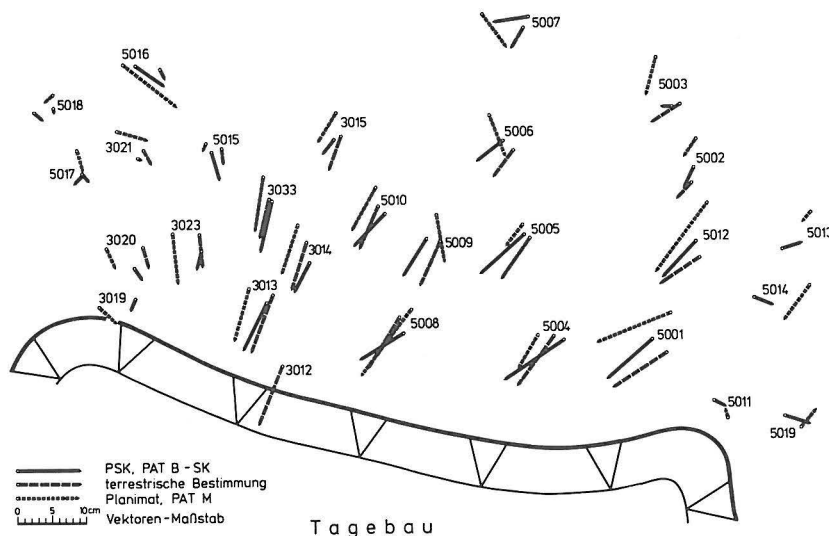


Abbildung 4

Abb. 4 zeigt in grundrißlicher Darstellung für die zusammengefaßten Perioden II und III die Verschiebungsvektoren, die sich aus den terrestrisch und photogrammetrisch bestimmten Lagekoordinaten der Kontrollpunkte ergeben. Die gute Übereinstimmung der PSK-Ergebnisse mit den Beträgen und Richtungen der terrestrisch gemessenen Punktverschiebungen ist auffällig: Der mittlere Verschiebungsfehler ist  $m_V = \pm 0,9$  cm und der mittlere Richtungsfehler  $m_R = \pm 13,6$  gon.

Auch die Planimatauswertungen haben nach Größe und Richtungen im allgemeinen noch brauchbare Verschiebungsvektoren geliefert:

$$m_v = \pm 1,5 \text{ cm}; m_R = \pm 23,1 \text{ gon.}$$

Auf noch nicht eliminierte systematische Fehler deuten eine nach Westen abnehmende Parallelversetzung der photogrammetrischen Punktkoordinaten und scheinbare Verschiebungen an terrestrisch unveränderten Punkten im Osten hin; das ändert aber nichts an der generell guten Brauchbarkeit speziell der PSK-Ergebnisse.

## 6. Schlußfolgerungen

Die Aerophotogrammetrie ist als Hilfsmittel für Bodenbewegungsmessungen einsetzbar, wenn die Lageänderungsvektoren sich der Größenordnung von 5 cm pro Meßperiode nähern. Voraussetzung sind Mehrfachbefliegungen und der Einsatz von Präzisionskomparatoren mit möglichst immer demselben Auswerter und von EDV-Programmen für Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung. Weitere Genauigkeitssteigerungen wären - entsprechend gute Paßpunktbestimmungen vorausgesetzt - noch denkbar durch Anwendung neuester Komparatoren, durch Kammerkalibrierung über Testfeldern, Verbesserung der Signalisierung und durch Ansatz zusätzlicher Parameter für die Selbstkalibrierung. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Vergleich zu terrestrisch-geodätischen Messungen ist noch zu untersuchen. Dabei ist der Auslastungsgrad der notwendigen photogrammetrischen Einrichtung ein wichtiges Kriterium.

## 7. Zusammenfassung

Am Rand großer Tagebaue können horizontale und vertikale Bodenbewegungen auftreten. Sie müssen durch häufige Wiederholungsmessungen möglichst genau überwacht werden. Terrestrische Messungen zur Erfassung der horizontalen Bewegungen (angestrebter Punkt-Lagefehler  $m_{x/y} = 2 \text{ cm}$ ) sind so aufwendig, daß die Aerophotogrammetrie möglicherweise eine wirtschaftliche Alternative sein kann. Es wird über ein Versuchsprogramm zur Feststellung der Genauigkeit von Punktverschiebungsmessungen in vielfach verknüpften Bildverbänden aus Vierfach-Befliegungen berichtet. Die mit dem Zeiss Planimat, Planicomp und PSK aus Weitwinkelaufnahmen im Bildmaßstab 1:7000 und verschiedenen, auch selbstkalibrierenden Blockausgleichungsprogrammen erreichten Genauigkeiten werden terrestrischen Vergleichsmessungen gegenübergestellt. Die Koordinatenrestfehler der Kontrollpunkte lagen durchweg unter 2 cm. Damit lassen sich günstigenfalls Verschiebungsvektoren der Größenordnung unter 5 cm bestimmen.

Literaturverzeichnis:

- [1] ACKERMANN, F.: Stand und Tendenzen der numerischen Photogrammetrie. Vortrag der 35. Photogrammetrischen Woche, Stuttgart 1975
- [2] EBNER, H.: Self Calibrating Block Adjustment. Invited Paper, XIII ISP Congress Helsinki, 1976
- [3] HEYLL, H.: Massenermittlung im Rheinischen Braunkohlentagebau mittels Luftbildmessung und elektronischer Rechen-technik. Presented Paper, IX. ISP Congress London, 1960
- [4] KLEIN, H.: Neue Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern. Vortrag der 37. Photogrammetrischen Woche, Stuttgart 1979
- [5] REICHENBACH, K.: Terrestrische Tagebauvermessung. Braunkohle, Tagebautechnik, Energieversorgung, 28 (1976) H. 8., S. 276-282
- [6] REICHENBACH, K.: Terrestrische und aerophotogrammetrische Vermessung großer Tagebaue im Rheinischen Braunkohlenrevier. BuL 47 (1979)H. 6., S. 173-178

Tabelle 1: Aerophotogrammetrische Bodenbewegungsmessungen, Versuch Rheinbraun

Befliegungen, Auswertungen und Beobachtungsperioden







Flugdatum Kammer	m <sub>B</sub>	Streifenanzahl und Lage	Auswertegerät u. Operateur (...)	Datum der terr. Messung	Nr. der Periode	Dauer der Periode
<u>17.12.78</u> 15/23 A II	3000 8000	2  6 	Planimat (A) Planimat (A)	5.12.78	I	3 Monate
<u>9.4.79</u> A II	3000 7000	2  6 	Planimat (A) Planimat (A) Planicom (B) PSK (A)	12.3.79		
<u>14.7.79</u> A IV	7000	6 	Planimat (A) Planicom (B)	26.6.79	II	3 Monate
<u>4.12.79</u> A IV	7000	6 	Planimat (A) PSK (A)	29.11.79	III	5 Monate



Tabelle 2: Aerophotogrammetrische Bodenbewegungsmessungen, Versuch Rheinbraun

Ergebnisse der Lage-Blockausgleichungen

Flugdatum	$m_B$	Gerät/Programm	$\sigma_o$ ( $\mu m$ )	$\sigma_o$ (cm)	$m_x$ (cm)	$m_y$ (cm)	$\epsilon_{x/y}$ max (cm)
17.12.78	3000 <sup>1)</sup> 8000 <sup>2)</sup>	Planimat/PAT-M 43	9,7	2,9	4,3	4,1	8,1/9,1
		Planimat/PAT-M 43	7,8	6,2	4,2	4,8	10,0/9,9
9.4.79	3000 <sup>1)</sup> 7000 <sup>2)</sup>	Planimat/PAT-M 43	8,7	2,6	4,9	2,7	10,4/8,3
		Planimat/PAT-M 43	7,1	5,0	3,6	2,9	7,3/6,5
		Planicom/PAT-M 43	6,3	4,4	3,6	4,0	6,1/7,3
		PSK/PAT-B	5,4	3,7	2,9	3,1	9,9/6,0
		PSK/PAT-B (SK)	4,0	2,8	1,7	1,4	3,2/3,0
14.7.79	7000 <sup>2)</sup>	Planimat/PAT-M 43	6,8	4,8	4,7	2,1	9,3/3,6
		Planicom/PAT-M 43	6,1	4,3	3,6	3,7	6,1/6,3
4.12.79	7000 <sup>2)</sup>	Planimat/PAT-M 43	7,0	4,9	2,8	2,5	6,3/5,1
		PSK/PAT-B	5,0	3,5	2,2	1,4	4,6/2,4
		PSK/PAT-B (SK)	4,4	3,1	1,8	1,3	4,7/2,6

1) 1-fach-Block

2) 4-fach-Block (gegenparallel und gekreuzt)

$m$  = Mittlere Koordinatenfehler an den Kontrollpunkten

$\epsilon$  = Maximale Koordinatenfehler an den Kontrollpunkten

Tabelle 3: Aerophotogrammetrische Bodenbewegungsmessungen, Versuch Rheinbraun

Vergleich der Komparator-Messungen

Ergebnisse der Lageblockausgleichungen ohne und mit Selbstkalibrierung

$m_B = 7000$ , alle Werte in cm

Flugdatum	Paßpunktversion <sup>1)</sup> Punktart	$\sigma_o$		$m_x$		$m_y$	
		ohne SK	mit SK	ohne SK	mit SK	ohne SK	mit SK
9.4.79	a	3,7	2,8	-	-	-	-
	Bildpunkt	-	-	3,2	2,4	3,4	2,5
	Paßpunkt	-	-	1,1	0,8	1,2	0,8
	Kontrollpunkt	-	-	2,9	1,7	3,1	1,4
	b	3,7	2,8	-	-	-	-
	Bildpunkt	-	-	3,2	2,4	3,4	2,5
Paßpunkt	-	-	1,4	1,0	1,5	0,8	
Kontrollpunkt	-	-	2,1	1,4	2,5	1,4	
4.12.79	a	3,5	3,1	-	-	-	-
	Bildpunkt	-	-	3,3	2,7	3,0	2,8
	Paßpunkt	-	-	0,9	0,7	1,3	1,2
	Kontrollpunkt	-	-	2,2	1,8	1,4	1,3
	b	3,5	3,1	-	-	-	-
	Bildpunkt	-	-	3,3	2,7	3,0	2,7
Paßpunkt	-	-	1,0	0,7	1,2	1,1	
Kontrollpunkt	-	-	2,0	1,7	1,8	1,7	

1) a = 1 Paßpunkt am Tagebaurand, 2 Basislängen Abstand

b = 2 Paßpunkte am Tagebaurand

$m$  = Mittlere Koordinatenfehler an den Kontrollpunkten

$\epsilon$  = Maximale Koordinatenfehler an den Kontrollpunkten