

ZUR ANWENDUNG DER UV-MOTOGRAFIE
BEI MODELLVERSUCHEN IM GRUNDBAU
J. Peipe
K.-H. GÜthner
Hochschule der Bundeswehr München
FR Germany
Commission V

Abstract

Zones of progressive failure are formed by a foundation load of a soil model simulated by aluminium rodlets ("Schneebeli-Model"). The traces of movement of selected rodlets are recorded in one photograph. The technique of Motography here is based on the fluorescence of luminous paint illuminated by UV-light. The determination of the main parameters of the procedure such as type of camera, film, filter and environmental conditions is described.

Sommaire

Dans un modèle du sol simulé par des bâtonnets d'aluminium (« Schneebeli-Modell ») on produit des déformations par une pression exercée sur des fondations. On enregistre les traces de mouvement de bâtonnets choisis dans une seule photo. Le procédé de motographie qu'on emploie ici est basé sur la fluorescence de couleur phosphorescente, illuminée par de la lumière ultraviolette. On décrit ici la détermination des paramètres essentiels du procédé, par exemple le type de l'appareil photographique, du film et du filtre.

Zusammenfassung

Bei der Belastung eines Modellbodens aus Aluminiumstäbchen ("Schneebeli-Modell") durch ein Fundament werden Bruchfiguren erzeugt. Die Bewegungsspuren diskreter Punkte des Modells werden photographisch aufgezeichnet. Das Verfahren beruht auf der Fluoreszenz von Leuchtfarbe, die mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird.

1. Einleitung

Photographie und Photogrammetrie werden schon seit langer Zeit dazu benutzt, die Bewegungen von Objekten zu erfassen und zu analysieren. Anwendungen finden sich in der Medizin, Biologie, Ergonomie, Arbeits- und Sportwissenschaft und im Ingenieurwesen (ZELLER 1953, BREWER 1962, HELLMIEIER 1980, BAUM 1983 u.a.). Es sind verschiedene Methoden der photographischen Aufzeichnung bekannt (z.B. Hochfrequenzphotographie, Mehrfachbelichtungen, Leuchtpuraufnahmen). Zu den Leuchtpurverfahren ist auch die Motografie zu rechnen. Sie läßt sich definieren als "eine objektive Methode zur berührungslosen Bewegungsaufzeichnung mit Hilfe von Strahlungsspuren, die trotz der dabei notwendigen langen Verschlussöffnungszeit der Kamera nicht zwangsläufig auf Dunkelheit angewiesen ist" (BAUM 1983). Die Bewe-

gungsspuren diskreter Punkte des Objekts werden in einem einzigen Bild kontinuierlich registriert; aus ihnen lassen sich die Informationen ableiten, die den Nutzer des Verfahrens interessieren. Zur Signalisierung der Punkte dienen Glühlämpchen, Leuchtdioden, Lichtleitfasern oder Markierungen aus Leuchtfarbe. Verschiedenfarbige Signale erleichtern bei komplizierteren Bewegungsabläufen die Interpretation.

Um die Leistungsfähigkeit der Methode zu verdeutlichen, wird ihre Anwendung bei der Analyse von Deformationen beschrieben, die bei Modellversuchen im Grundbau auftreten.

2. Problemstellung

Es ist eine Aufgabe des Bauingenieurs, die Auswirkungen zu untersuchen, die ein belasteter Gründungskörper (Fundament, Pfahl u.ä.) auf den Boden ausübt. Dabei treten elastische Verformungen auf. Bei Überbeanspruchung des Bodens entstehen Gleit- und Bruchvorgänge in Abhängigkeit vom Lastangriff und von der Bodenart (Kies, Sand, Ton u.a.); es gilt, diese rechnerisch zu erfassen, um das Bauwerk mit ausreichender Sicherheit zu konstruieren.

Ein typischer Berechnungsfall ist der Grundbruch. Dieser tritt ein, wenn ein Gründungskörper so stark belastet wird, daß sich unter ihm im Boden mehr oder weniger ausgeprägt Gleitbereiche bilden, in denen der Scherwiderstand des Bodens überwunden wird (DIN 4017). Ein Grundbruch wird bestimmt durch geometrische Parameter (Einbindetiefe, Breite und Seitenverhältnis des Gründungskörpers) und bodenmechanische Größen (Scherparameter und Wichte des anstehenden Bodens).

Diese Bedingungen lassen sich im Modell simulieren. In den im folgenden beschriebenen Untersuchungen wird das "Schneebeli-Modell" verwendet. Dabei wird der natürliche Boden durch zylindrische Aluminium-Stäbchen mit unterschiedlichem Durchmesser ersetzt (ebener Belastungsfall). Die Gesamtheit der Stäbchen ist mit einem Sand- oder Kiesboden vergleichbar, also einem Material, das nur Reibungskräfte übertragen kann. Über einen belasteten Modellkörper (z.B. ein Fundament) werden Kräfte auf die Stäbchen übertragen, die dann - in Abhängigkeit von der Belastung und den Abmessungen des Körpers - die Verformungen im Modell zeigen. Ziel ist es, einen deutlichen Bruch im Modellboden zu registrieren und die am Fundament aufgeführten Kräfte mit den Gewichtskräften des gemessenen Bruchkörpers sowie dem Scherwiderstand in der Bruchfuge statisch zu vergleichen. Das "Schneebeli-Modell" hat den Vorteil, daß Bewegungen und Bruchvorgänge schnell erzeugt und photographisch dokumentiert werden können.

3. Versuchsaufbau

Anknüpfend an die Arbeiten von SCHNEEBELI und ARENS (1975) werden in einem Stahlrahmen zylindrische Aluminiumstäbchen von 60 mm Länge aufgeschichtet (Abb. 1). Um das Modell den physikalischen Eigenschaften eines natürlichen Bodens möglichst gut anzunähern, werden Stäbchen mit drei verschiedenen Durchmessern (6 mm, 4 mm und 3mm; Abb. 2) im Mischungsverhältnis 1:2:4 (Abb. 3) eingebracht. Ihre Frontseiten bilden eine Fläche von

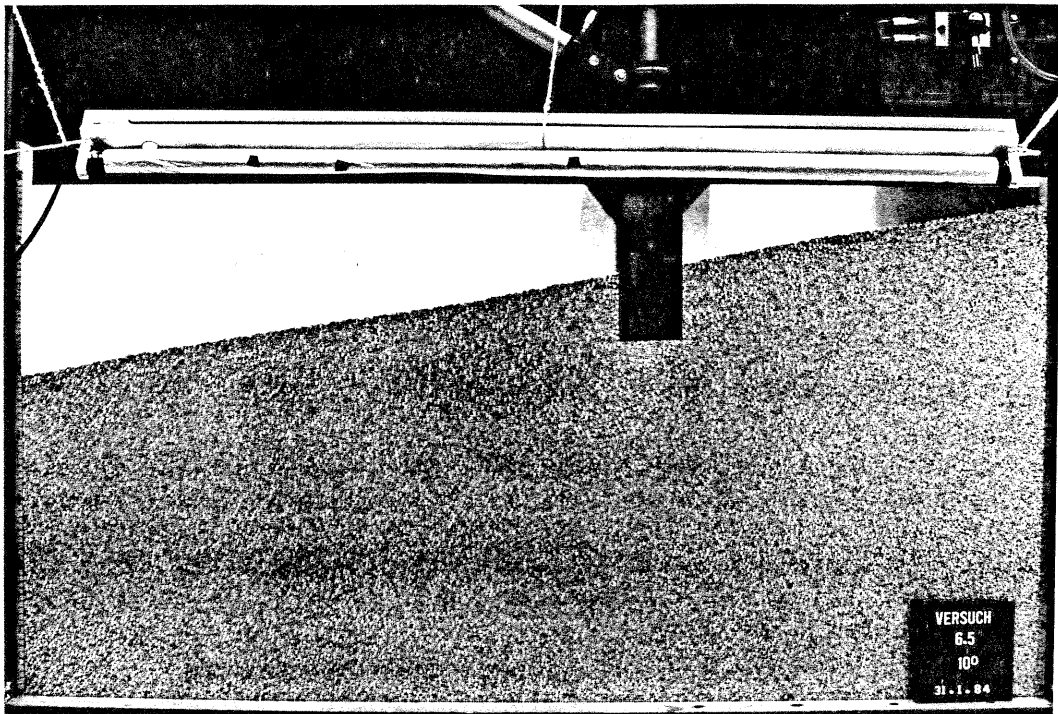


Abb. 1: Versuchsaufbau: Schneebeli-Modell mit Aluminiumstäbchen, Fundament und hydraulischer Pumpe; im Vordergrund ist eine UV-Leuchtstoffröhre aufgehängt.
Aufnahme bei Tageslicht: Die Stäbchen bilden sich als gleichförmige Masse ab.
(Ausschnitt, M=1:12)

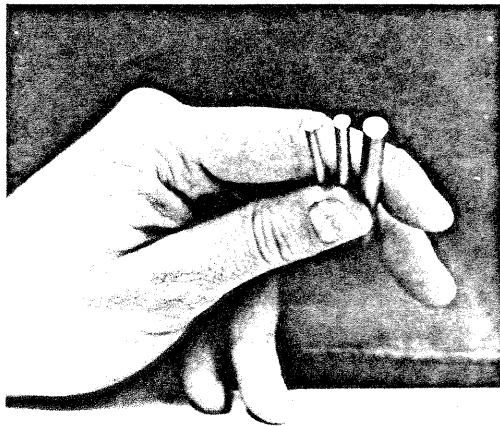


Abb. 2: Aluminiumstäbchen für das Schneebeli-Modell

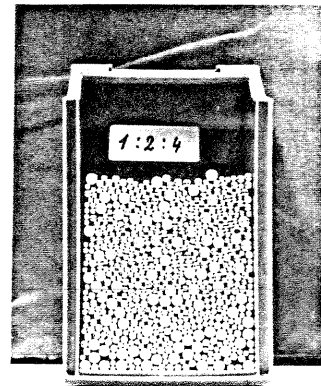


Abb. 3: Modellboden (Mischungsverhältnis 1:2:4)

1,6 m Länge und 0,7 m Höhe und stellen einen senkrechten Schnitt durch den Modellboden dar. Um dessen Verhalten bei Belastung zu untersuchen, wird mit Hilfe einer hydraulischen Handpumpe ein Quader aus Hart-PVC als Modellfundament lotrecht eingepreßt; die dabei entstehenden Bewegungen der Stäbchen werden fotografiert.

Grundlage der Aufnahmetechnik ist die Fluoreszenz von Leuchtfarbe, die mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird. Ein Teil der Stäbchen wird mit einer zentrischen Bohrung von 0,8 mm Durchmesser versehen und diese mit weißer Leuchtfarbe gefüllt (*). In den Schnittpunkten eines quadratischen Rasters werden die im Modell vorhandenen Stäbchen durch mit Leuchtfarbe präparierte ersetzt (Abstand 50 mm bzw. - im Bereich des Fundaments, wo die größten Veränderungen zu erwarten sind - 25 mm). Um die Bewegungen an der Oberfläche des Modells erkennen zu können, wird die oberste Reihe der Stäbchen ebenfalls ausgetauscht. Auch das Fundament wird mit Leuchtfarbe markiert. Bei der Bestrahlung mit UV-Licht aus zwei handelsüblichen Schwarzlicht-Lampen (je 40 Watt) fluoreszieren die markierten Stäbchen und treten deutlich hervor (Abb. 4). Wenn nun das Fundament in den Modellboden eingepreßt wird, werden die Deformationen als Bewegungsspuren diskreter Punkte sichtbar (Abb. 5). Eine vor dem Modell aufgestellte Kamera, deren Verschuß während des Versuchs (bis zu 30 Sekunden) geöffnet bleibt, zeichnet alle Leuchtspuren in einem einzigen Bild auf. Wegen der langen Belichtungszeit zeigen sich auf den Aufnahmen auch die Umrisse des Modells und unscharfe Konturen der bewegten, aber nicht mit Leuchtfarbe markierten Stäbchen, so daß die Grenze zum unbewegten Teil des Modells erkennbar ist. Damit das UV-Licht der Lampen den Film nicht schwärzt, wird die Kamera durch einen Filter geschützt, der für Licht mit einer Wellenlänge < 440 nm undurchlässig ist. Um das Raumlicht abzuhalten, das den Film belichten würde, wurde eine Kabine um Modell und Kamera herum gebaut. Eine andere Möglichkeit bietet der Vorschlag, den Raum mit einer Natriumniederdruckdampflampe zu erhellen, die monochromatisches Licht abstrahlt. Dieses wird von einem zusätzlichen Filter abgehalten, so daß wiederum nur die Leuchtspuren auf dem Film erscheinen. So können mit der Motografie auch Bewegungen erfaßt werden, die nur bei Licht ungehindert ablaufen (BAUM 1983). Dieses Verfahren wurde im vorliegenden Fall nicht gewählt, weil wegen des zusätzlichen Filters die Intensität der Leuchtspuren geringer ist und nur mit einigem instrumentellen Aufwand erhöht werden kann. Außerdem wird während des Modellversuchs kein Raumlicht benötigt, da lediglich die hydraulische Pumpe und der Kameraauslöser zu bedienen sind.

*) Leuchtfarbe ist eine "passive" Lichtquelle, die erst durch Bestrahlung zum Leuchten angeregt wird. "Aktive" Lichtquellen wie Glühlämpchen u.a. für die Signalisierung von einigen Hundert Stäbchen zu verwenden, ist zu aufwendig; zudem würden die für die Stromversorgung notwendigen Kabelverbindungen die Bewegungen im Modell behindern und unzulässig verfälschen.

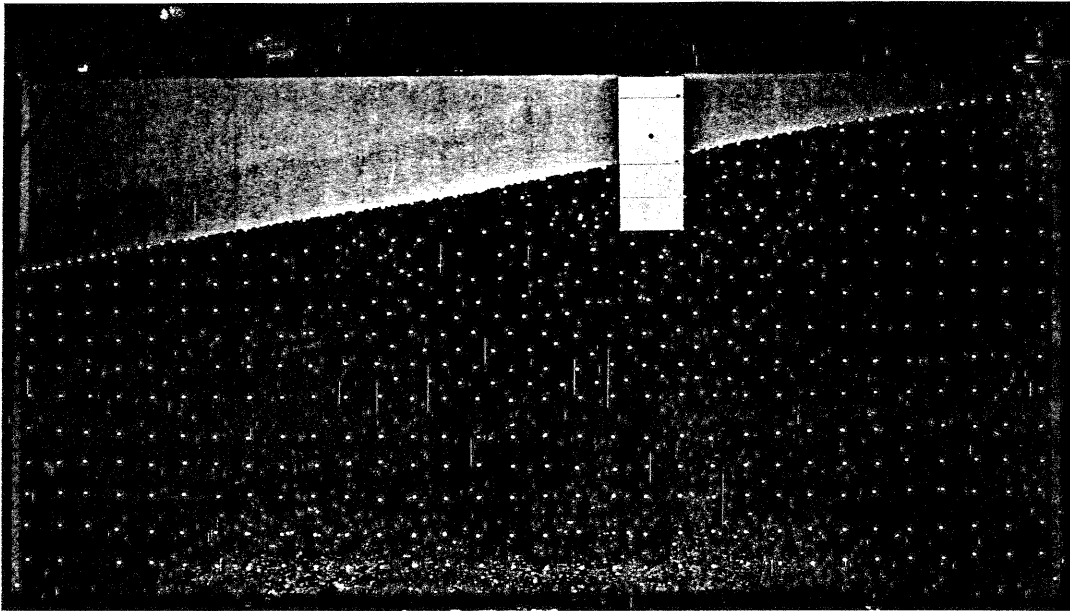


Abb. 4: Modell vor Beginn des Versuchs:
Aufnahme bei UV-Licht; die mit Leucht-
farbe präparierten Stäbchen sind deut-
lich zu erkennen (vgl. Abb. 1).

(NIKON F3; Blende 5,6; Belichtung 8 s;
Ausschnitt, M=1:12)

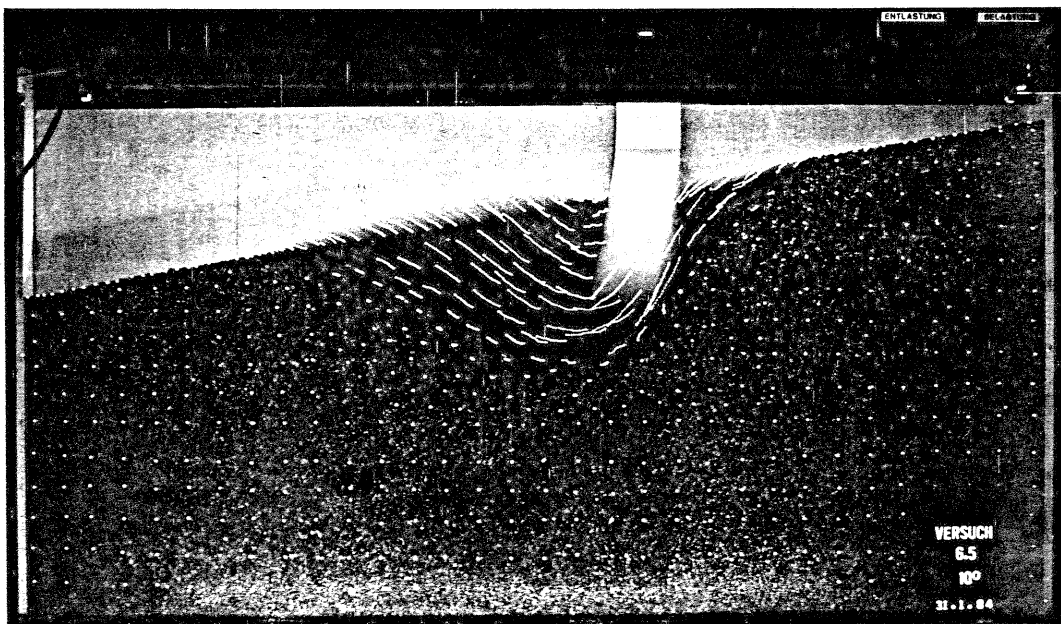


Abb. 5: Aufzeichnung der Bewegungsspuren während
des Versuchs

(Technische Daten wie Abb. 4; Belichtung 20 s)

4. Aufnahme des Schneebeli-Modells

Das Instrumentarium für die photographische Aufzeichnung des Bewegungsvorgangs besteht aus Kamera, Filter und Film. Grundsätzlich ist jede Kamera geeignet, die es ermöglicht, den Verschluss beliebig lange geöffnet zu halten. Wegen der geringen Intensität der Fluoreszenz, die durch die UV-Bestrahlung der Farbpartikel erzeugt wird, sollten lichtstarke Objektive und hochempfindliches Fotomaterial benutzt werden.

Am besten geeignet erwies sich als Schwarzweiß-Negativfilm AGFA Vario XL (1600 ASA/33 DIN) *). Um das Ergebnis eines Versuchs direkt anschließend kontrollieren und demonstrieren zu können, wurden die Schwarzweiß-Positivfilme POLAROID Typ 611 (200 ASA/24 DIN) und Typ 667 (3000 ASA/36 DIN) verwendet. Zur sofortigen Präsentation eignet sich auch der Schwarzweiß-Diapositivfilm POLAROID Polagraph (400 ASA/27 DIN).

Die Modellversuche wurden mit drei verschiedenen Kameras aufzeichnet. Dies ist sinnvoll, weil das Ergebnis der Aufnahme damit unterschiedlichen Anforderungen des Bauingenieurs genügt. Die Zusammenhänge zwischen dem benutzten Instrumentarium und der jeweiligen Aufgabenstellung zeigt Tabelle 1.

Kamera Objektiv	Bildformat Bildmaßstab	Film- material	Aufgabenstellung Auswertergebnis
NIKON F3 Nikkor 1:1,4 / 50 mm	24x36 mm ² 1:48	AGFA Vario XL und POLAROID Polagraph	Demonstration der Versuchsergebnisse - - - Vergrößerte Papier- abzüge und Klein- bild-Diapositive (auch Sofort-Dia)
ROLLEIFLEX SLX (mit Réseau) Planar 1:2,8 / 80 mm	60x60 mm ² 1:31	AGFA Vario XL	Meßbilder für die photogrammetrische Auswertung - - - Koordinatenliste, Kartierung
		POLAROID Typ 611	Probeaufnahmen für Meßbilder
POLAROID 600 SE MAMIYA 1:4,7 / 127 mm	86x108 mm ² 1:18	POLAROID Typ 611 (667)	Sofortbild- dokumentation der Versuchsergebnisse (großes Bildformat)

Tabelle 1

*) Für die Aufnahme farbiger Spuren stehen im Handel gleichwertige Farbfilme zur Verfügung.

Welche Bewegungen im Schneebeli-Modell auftreten, zeigt Abb. 5 am Beispiel des Modellversuchs 6.5. Die geometrischen Parameter des Versuchs sind in Abb. 6 schematisch dargestellt. Unter dem Fundament wird bei mittig-lotrechter Belastung ein Grundbruch erzeugt. Zu erkennen sind (Abb. 5)

- die Verschiebungen der mit Leuchtfarbe markierten Stäbchen und des Fundaments nach Größe und Richtung,
- die Aufwölbung der Modelloberfläche,
- die Grenze zwischen dem bewegten und dem unbewegten Teil des Modellbodens (Bruchfuge).

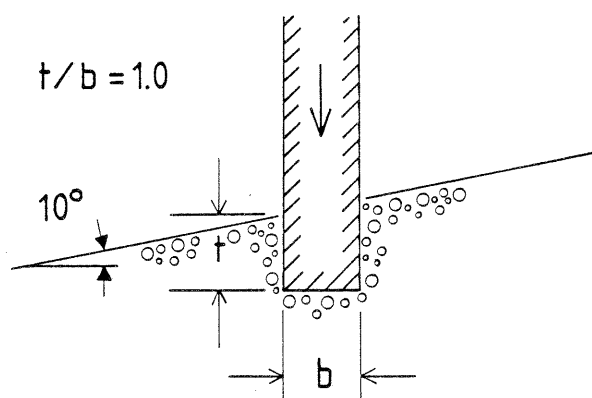


Abb. 6: Versuch 6.5: Flachgründung in der Böschung (Einbindetiefe $t = 0,1$ m; Breite des Fundaments $b = 0,1$ m; Böschungswinkel 10°)

5. Photogrammetrische Auswertung

Ist über die qualitative Darstellung der Bruchvorgänge hinaus eine exakte Aussage über den Weg der Stäbchen und des Modellfundaments während der Belastung erforderlich, wird man die Bilder photogrammetrisch auswerten.

Zu diesem Zweck wurde bei der Aufnahme der Grundbruchversuche die Mittelformat-Kamera ROLLEIFLEX SLX benutzt (Tab. 1), und zwar in ihrer Ausführung als Teil-Meßkammer mit Réseau (11 x 11 Punkte, als Quadratraster mit 5 mm Abstand angeordnet) *). Die Kalibrierdaten für die Kammerkonstante, die Koordinaten des Bildhauptpunktes und die Verzeichnung stammen aus einer kurz vor den Versuchsaufnahmen durchgeführten Testfeldkalibrierung (nach der Methode der Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung (WESTER-EBBINGHAUS 1983b)). Abb. 7 zeigt eine Meßaufnahme mit den Bewegungsspuren eines weiteren Grundbruchversuchs. Damit die Réseaukreuze sich vom dunklen Hintergrund abheben, mußte eine Réseau-Vorbelichtung erfolgen. Am linken und rechten Rand des

*) Nähere Angaben zum Kammer-System finden sich z.B. bei WESTER-EBBINGHAUS (1983a).

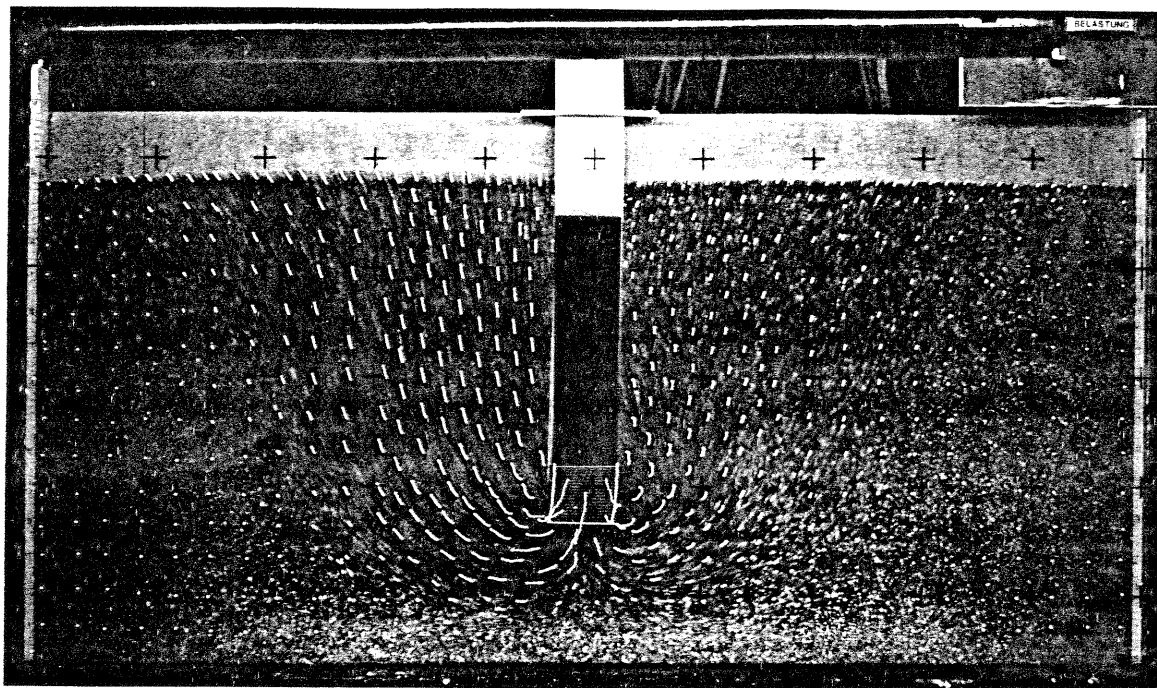


Abb. 7: Meßaufnahme mit Bewegungsspuren
(ROLLEIFLEX SLX; Blende 8;
Belichtung 30 s; Ausschnitt, M=1:11)

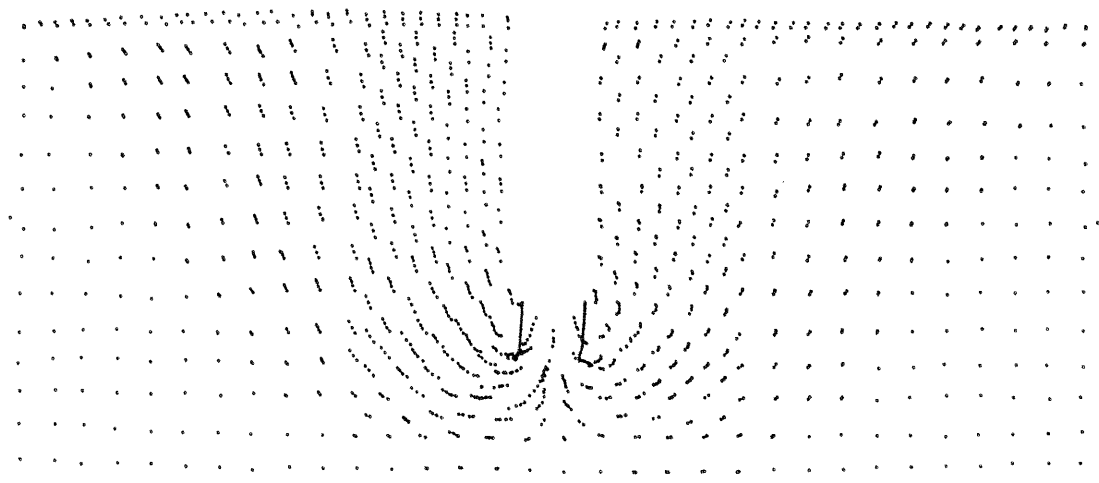


Abb. 8: Photogrammetrische Auswertung
(Verkleinerung der Original-
zeichnung, M=1:11)

Modells ist - außerhalb der Stäbchenfront, aber in einer Ebene mit ihr - je eine Maßstabsleiste befestigt. Auf beiden Leisten sind je drei Punkte als Paßpunkte mit Leuchtfarbe markiert.

Für die monoskopische Auswertung der Bildnegative stand ein ZEISS PLANICOMP C 100 zur Verfügung. Die Bewegungsvektoren wurden als eine Folge von Einzelpunkten gemessen. Durch maschenweise Transformation der registrierten Koordinaten auf das Soll-Réseau der ROLLEIFLEX SLX wurden die systematischen Bildfehler korrigiert (KOTOWSKI 1984). Die so erhaltenen Bildkoordinaten wurden projektiv auf die Objektkoordinaten der Paßpunkte transformiert. Dies ist gerechtfertigt, weil die aufgezeichneten Bewegungsspuren und die Paßpunkte in derselben Ebene liegen. Die mittleren quadratischen Restabweichungen an den Paßpunkten betragen $\pm 0,2$ mm und genügen damit den Genauigkeitserwartungen des Bauingenieurs.

Nachzutragen ist noch, daß die Objektkoordinaten der Paßpunkte mit Hilfe einer zusätzlichen (konvergenten) Aufnahme des Versuchsmodells (ohne Bewegung) photogrammetrisch bestimmt wurden. Durch relative und absolute Orientierung wurden Näherungskoordinaten für die anschließende Bündelausgleichung mit dem Programm MOR (WESTER-EBBINGHAUS 1984) berechnet. Als geodätische Beobachtungen wurden zwei Strecken auf den Maßstabsleisten in die Ausgleichung eingeführt, die mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm bekannt waren.

Als Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung liegt ein ebenes Punktfeld mit bekannten Objektkoordinaten X, Y vor (Abb. 8). Diese können für weiterführende Berechnungen im Grundbau verwendet werden.

Um die photogrammetrischen Ergebnisse und zugleich die Zuverlässigkeit des Versuchsmodells zu überprüfen, wurde die Bruchfuge aus den Objektkoordinaten bestimmt und der Linie gegenübergestellt, die sich gemäß DIN 4017 für Grundbruchberechnungen ergibt. Diese ist aus Versuchen mit natürlichem Bodenmaterial abgeleitet worden und besteht aus zwei Geraden, die durch eine logarithmische Spirale verbunden sind. Als Resultat des Vergleichs zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Bruchfiguren (Abb. 9).

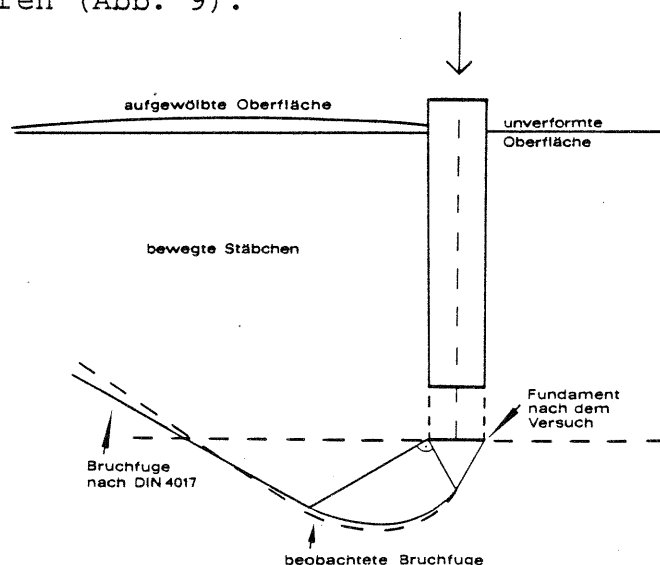


Abb. 9:
Vergleich der
Bruchfiguren
($M = 1:12$)

6. Schlußbemerkungen

Die UV-Motografie hat sich als effiziente Methode erwiesen, um die bei Bruchvorgängen im Schneebedi-Modell entstehenden Bewegungen zu demonstrieren und ausmeßbar zu machen. Für den Nutzer (Bauingenieur) diente die Analyse der Grundbruchversuche vor allem dazu, das Modell zu überprüfen und zu eichen, d.h. die Ergebnisse mit den heute üblichen rechnerischen Ansätzen nach der DIN-Norm zu vergleichen. Ziel künftiger Arbeiten ist es, das Bruchverhalten des Modellbodens unter komplizierteren statisch wirksamen Gründungskörpern zu untersuchen.

Dank

Die Verfasser danken Herrn Professor Horn und seinen Mitarbeitern vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Hochschule der Bundeswehr München für ihre Unterstützung.

Literatur

- ARENS, E., 1975: Ebene Grundbruchversuche mit lotrecht und schräg belasteten Streifen Gründungen. Dissertation Aachen.
- BAUM, E., 1983: Motografie II. Forschungsbericht Nr. 324, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- BREWER, R.K., 1962: Close-Range Photogrammetry - A useful tool in motion study. Photogrammetric Engineering, 28(4): 653-657.
- DIN 4017, Teil 1 (August 1979): Baugrund; Grundbruchberechnung von lotrecht mittig belasteten Flachgründungen.
- HELLMEIER, H.-J., 1980: Photogrammetrische Bewegungsanalyse mittels Bandabsorptionstechnik. XIV. ISP-Kongreß, Hamburg. International Archives of Photogrammetry, 23(B5): 321-328.
- KOTOWSKI, R., 1984: Zur Réseaukorrektur von systematischen Bildfehlern. Bildmessung und Luftbildwesen, 52(2): 96-101.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1983a: Ein photogrammetrisches System für Sonderanwendungen. Bildmessung und Luftbildwesen, 51(3): 118-128.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1983b: Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung - ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C/289, München.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1984: Ein allgemein formuliertes Konzept zur Bildtriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Presented Paper, XV. ISPRS-Kongreß, Kommission III, Rio de Janeiro.
- ZELLER, M., 1953: Stereophotogrammetry and studies of movements. Photogrammetric Engineering, 19(4): 654-655