

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure
<b>Herausgeber:</b>	Vereinigung Schweizerischer Petroleum-Geologen und -Ingenieure
<b>Band:</b>	39 (1972-1973)
<b>Heft:</b>	96
 <b>Artikel:</b>	 Beschreibung eines Grossversuches zur Bestimmung der Verformungsmoduli von Festgestein
<b>Autor:</b>	Friedli, Peter
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-198506">https://doi.org/10.5169/seals-198506</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## **Beschreibung eines Grossversuches zur Bestimmung der Verformungsmoduli von Festgestein**

mit 4 Abbildungen

von PETER FRIEDLI\*)

Das U. S. Bureau of Reclamation (USBR) als staatliche Institution für Projektierung und Ausführung von Bewässerungs- und Wasserkraftanlagen im westlichen Bereich der Vereinigten Staaten führte in den Jahren 1967 und 1969 ausgedehnte Untersuchungen zur Bestimmung von *in situ* Felseigenschaften im Fundationsbereich der Staumauer Auburn durch. Der als Kuppelstaumauer projektierte Auburn Dam soll in einem ca. 300 m tiefen Canyon auf der Westflanke der zentralen Sierra Nevada erstellt werden. Das Festgestein im Fundationsbereich besteht zur Hauptsache aus einem steil einfallenden Amphibolit mit basischen und ultrabasischen Einschlüssen und Zwischenschichten von Talk- und Chloritschiefern. Der Fundationsbereich weist zudem ausgeprägte Kluftsysteme sowie einige Verwerfungen auf. Der geologische Aufbau des interessierenden Talabschnittes sowie die Lage der verschiedenen Diskontinuitäten wurden anhand eines ausgedehnten Bohr- und Kartierungsprogramms erkundet. Die im Einflussbereich der Widerlagerkräfte hauptsächlich vorkommenden Gesteinstypen wurden anhand der verschiedensten Feld- und Laborversuche auf ihre felsmechanischen Eigenschaften geprüft.

Nebst den heute zumeist angewandten einaxialen Druckversuchen und Abscherver suchen wurde ein Stollenabpressversuch mit Druckkissen ausgeführt.

Im Prinzip ist dieser Versuch mit einem bei Kraftwerkbauten ab und zu durchgeführten Stollenabpressversuch vergleichbar.

Bei dem durch das USBR angewandten Versuchsvorgehen wird der im Versuchsstollen wirkende Innendruck mittels Druckkissen (Typ Freyssinet) aufgebracht. Diese weisen eine Breite von 40 cm und eine Länge von 250 cm auf. 16 Stück dieser Druckkissen wurden auf kreisförmigen Stützringen nebeneinander längs der Stollenwandung aufgebracht und gegen die rohe Stollenoberfläche mit Mörtel satt vergossen. Damit entsteht ein gegen die im Abstand von ca. 30 cm aufgestellten Stützringe sich abstützender Druckzylinder von 250 cm Länge, der satt an der Stollenwandung anliegt. Der Durchmesser des Versuchsstollens beträgt ca. 2.60 m. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass das zu prüfende Gestein nicht mit der Druckflüssigkeit in Berührung kommt.

Über die Druckkissen kann ein «Innendruck»  $p_i$  von max. 70 kg/cm<sup>2</sup> erzeugt werden. Unter diesen Verhältnissen entsteht eine Druckeinflusszone (1,0  $p_i$  bis 0,02  $p_i$ ), die radial gemessen bis ca. 10 m ab Stollenwandung in das Festgestein reicht.

Zur genauen Überwachung der innerhalb der Einflusszone stattfindenden Verformungen wurde vom USBR ein neuartiges Deformationsmessgerät entwickelt.

\*) dipl. Ing. ETH, c/o Schär + Friedli, Geotechnisches Büro, Zürich.

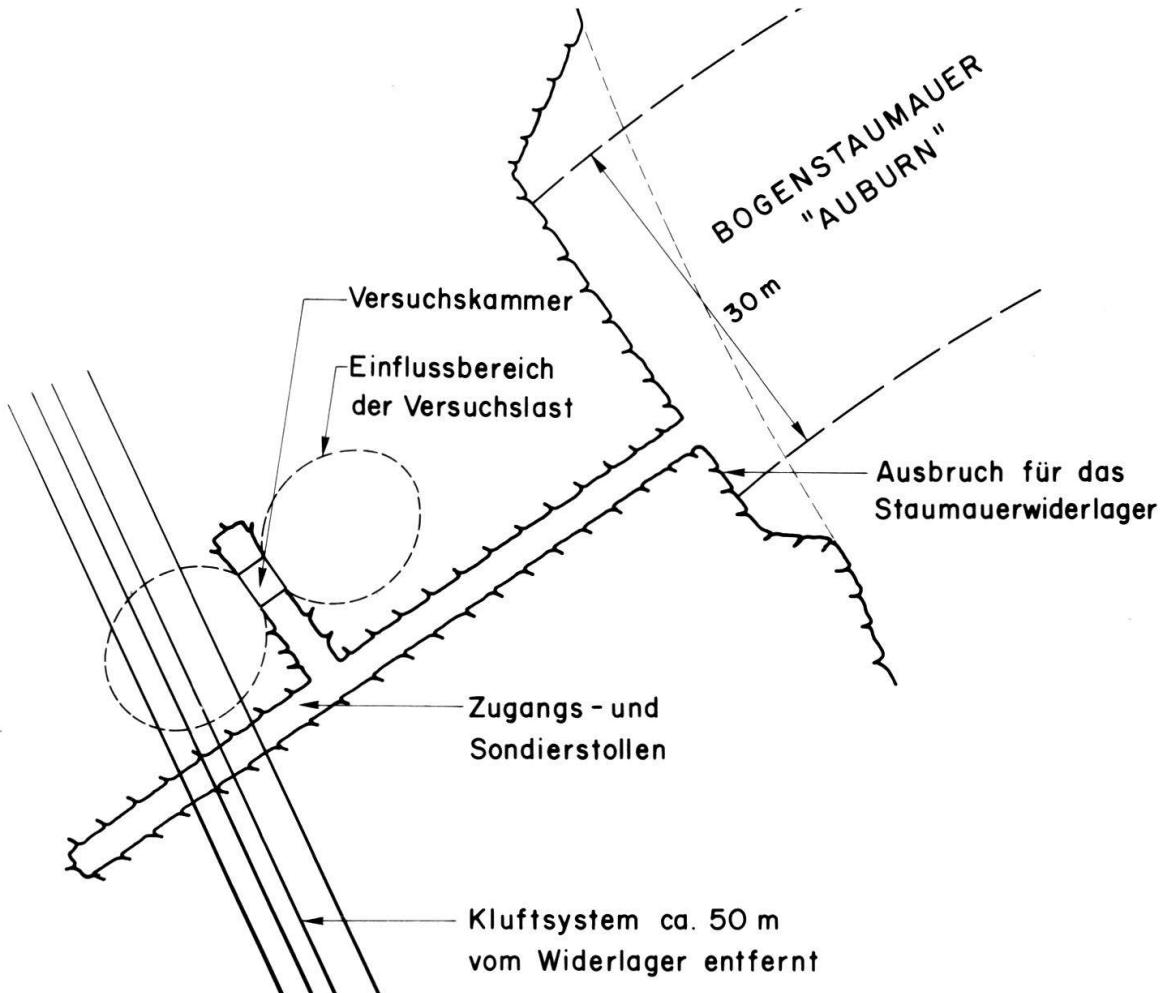


Abb. 1: Situation der Versuchsanordnung.

Dieses besteht aus einzelnen Ankern, die in ein  $\varnothing 3"$  Bohrloch eingeschoben und mittels Setzgestänge und Zentralgewinde in beliebiger Distanz festgesetzt werden können.

Nach Abschluss der Messungen können die Anker wieder gelöst und rückgezogen werden.

Die Anker sind einzeln mit einem Messgestänge versehen. Diese sind an ihrem freien Ende mit einem Induktionsmessgeber umgeben.

In Abb. 2 ist das Prinzip dieses mit 7 Ankern versehenen Messgerätes (REX-7P = Retrievable Extensometer – 7 Positions) skizziert.

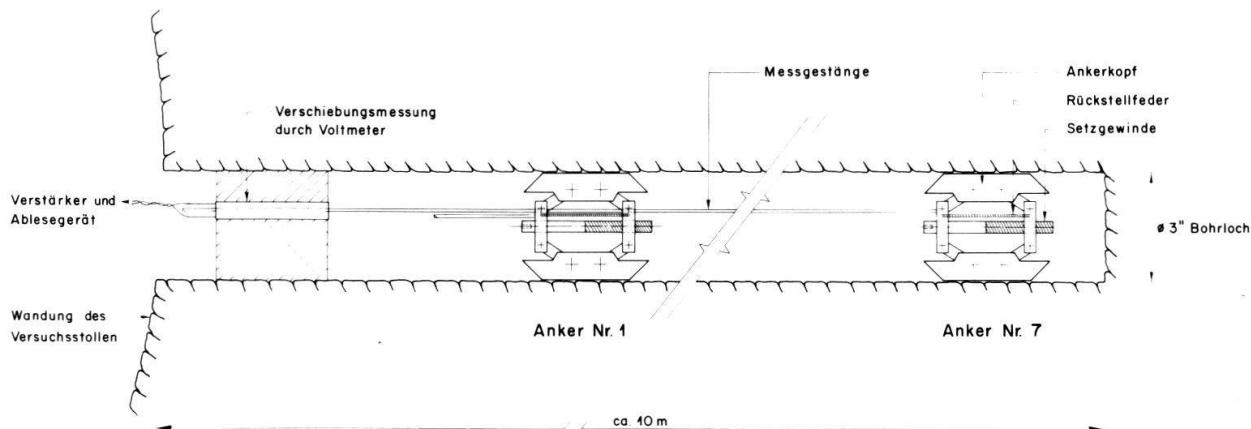
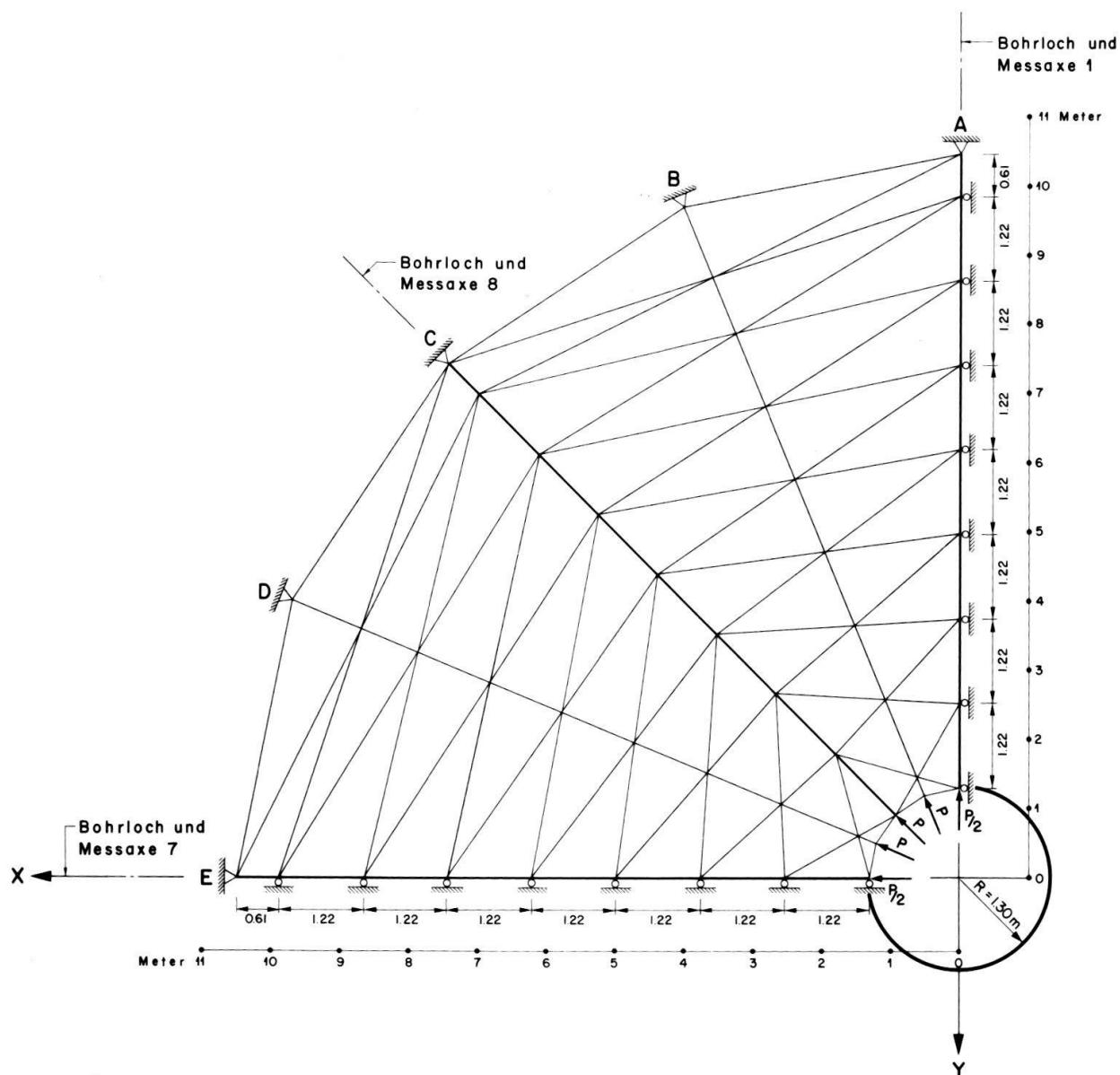


Abb. 2: Prinzipskizze des REX-7P Messinstrumentes mit Ankerköpfen.

Mit der gezeigten Anordnung wurden die Felsdeformationen zwischen Induktionsmessgeber und der jeweiligen Ankerstelle mit einer Genauigkeit von ca. 1/200 Millimeter gemessen.

Die Lage des Versuchsstollens wurde so gewählt, dass mehrere Hauptklüfte, die im Einflussbereich der Widerlagerkräfte der zukünftigen Staumauer liegen, hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens untersucht werden konnten (s. Abb. 1).



## Legende

E-Modul = "1" (70 310 kg/cm<sup>2</sup>)  
 Poisson-Zahl = 0.15  
 Raumgewicht  $\gamma$  = 2.48 t/m<sup>3</sup>  
 Scheibenstärke = "1" (30 cm)  
 Innendruck  $p_i$  = 70 kg/cm<sup>2</sup>  
 Eigengewicht berücksichtigt  
 Temperaturänderung nicht berücksichtigt

Abb. 3: Anordnung der finiten Elemente und Randbedingungen.

In der Mittelebene des Versuchsstollens wurden radial 8 Bohrungen zu ca. 10 m ab Stollenwandung ausgeführt. Innerhalb der Bohrungen wurden obige Deformationsmessgeräte à je 7 Anker versetzt. Auf Grund von Bohrlochaufnahmen wurde die Lage der Anker so gewählt, dass jeweils Deformationen von massigen und von zerklüfteten Gesteinsabschnitten gemessen werden konnten (s. Abb. 4).

Mit dem gewählten Versuchsvorgehen wurde ein grösserer Bereich anstehenden Gesteins hinsichtlich seines Verformungsverhaltens bei verschiedenen Drücken untersucht. Der gewählte Gesteinsbereich enthielt die im Fundationsbereich der Staumauer massgeblich vertretenen Gesteinstypen. Zudem konnte der Einfluss von Klüftung und Schichtung auf das Verformungsverhalten des Gesteins untersucht werden. Der Versuchsstollen wurde entsprechend der zu erwartenden Richtung der Auflagerkräfte der Staumauer orientiert.

Der Schreibende hatte anlässlich eines Studienaufenthaltes beim USBR Gelegenheit, bei der Auswertung der Messresultate aus dem beschriebenen Versuch mitzuwirken.

Die Versuchsauswertung erfolgte durch einen Vergleich von bei einem bestimmten «Innendruck» effektiv gemessenen Deformationen mit solchen die sich beim gleichen Innendruck unter Zugrundelegen eines Einheits-Verformungsmoduls theoretisch ermitteln lassen.

Die Ermittlung der theoretischen Deformationen erfolgte unter Einteilung der Einflusszone in finite Elemente gemäss Abb. 3. Da die Auswertung der Versuchsmessungen unter der Annahme erfolgte, dass die in ca. 10 m Tiefe versetzten Anker keinerlei Deformationen anzeigen, wurden auch die äussere Begrenzung und die dortigen Auflagerbedingungen der finiten Elemente entsprechend gewählt. Die Aufteilung längs der Stollenwandung ist einerseits möglichst engmaschig und folgt andererseits der Anordnung der Druckkissen. Die Lage der äusseren Knotenlasten entspricht der Breite der Druckkissen.

Die eingegebenen Materialkennwerte sind in Abb. 3 aufgeführt.

Belastungen und Verformungen im vorliegenden Fall entsprechen jenen eines ebenen Problems. Das verwendete Rechenprogramm erzeugt unter Annahme eines linearen Verschiebungsansatzes die Elastizitätsgleichungen der Einzelemente, die entsprechende Steifigkeitsmatrix, eine Transformationsmatrix zum Übergang vom lokalen ins globale Koordinatensystem sowie die Steifigkeitsmatrix für das Gesamtsystem. Darauf erfolgt die Lösung der Gleichungen unter Berücksichtigung der Verträglichkeits- und Auflagerbedingungen. Es wird ein ebener Verzerrungszustand angenommen. Das Eigengewicht der Einzelemente wird berücksichtigt. Für die berechneten Deformationen der Knotenpunkte der finiten Netzeinteilung längs der Messachsen wurde nach der Methode der kleinsten Quadrate eine Kurvengleichung gefunden, mit deren Hilfe die theoretischen Deformationen an den Ankerpunkten ermittelt werden konnten. Durch direkten Vergleich der theoretischen mit den effektiv gemessenen Deformationen innerhalb der Teilstücke zwischen den Ankern wurden über die Beziehung:

$$E_w = \frac{\epsilon_{th}}{\epsilon_w} \cdot E_{th} \quad (1)$$

wo:  $E_w$  = tatsächlicher Verformungsmodul

$E_{th}$  = als Einheitsmodul angenommener  
theoretischer Verformungsmodul

$\epsilon_w$  = im Grossversuch gemessene Dehnungen

$\epsilon_{th}$  = theoretisch ermittelte Dehnungen

die entsprechenden Verformungsmodule gefunden. Ein solches Vorgehen setzt voraus, dass die theoretische Spannungsverteilung der wirklichen entspricht.

In Abb. 4 sind die so bestimmten Verformungsmoduli zonenweise zusammengefasst. Die aufgeföhrten Werte entsprechen dem elastischen Verformungsanteil, der sich nach Abfolge mehrerer Lastzyklen ergab.

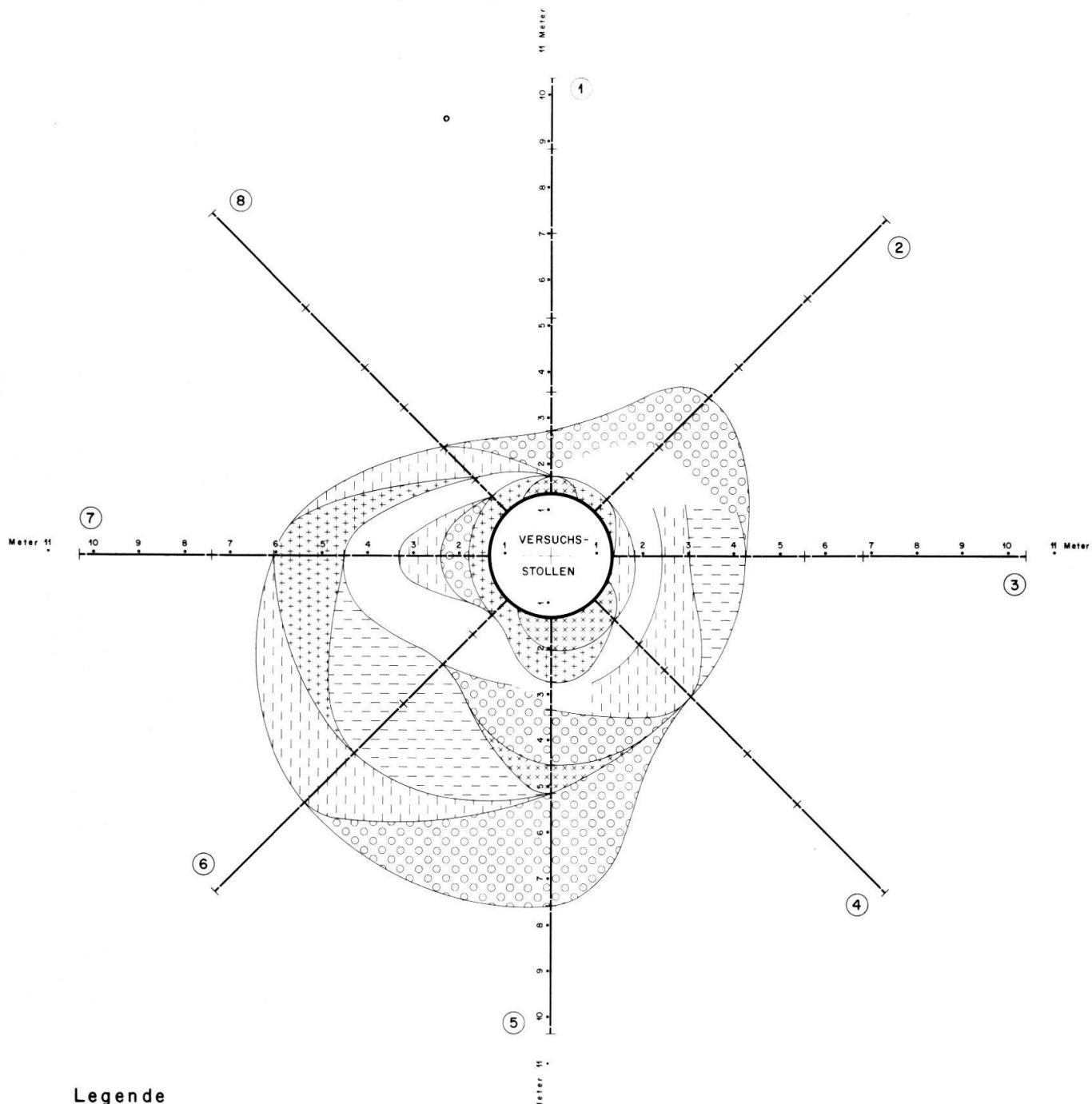


Abb. 4: Übersicht über die Verformungsmoduli der einzelnen Messabschnitte bei Innendruck  $p_i = 70 \text{ kg/cm}^2$ .

Der plastische Verformungsanteil wurde ebenfalls gemessen und entsprechend ausgewertet.

Unter konstant gehaltener Last konnte ein primäres Kriechen des Gesteinsmaterials beobachtet werden, das ca. 24 Stunden nach Versuchsbeginn deutlich abnahm.

Die kleinen E-Werte längs dem Stollenumfang repräsentieren die durch den Stollenausbruch gestörte Gesteinszone.

Das beschriebene Versuchs- und Auswertungsvorgehen ermöglichte es, die Verformungseigenschaften der im Fundationsbereich der Staumauer zur Hauptsache vorkommenden Gesteinstypen unter wirklichkeitsgetreuen Bedingungen zu bestimmen und namentlich auch den Einfluss von Diskontinuitäten auf deren Grösse festzuhalten.

Auf Grund der den verschiedenen Gesteinszonen zugeordneten Verformungsmoduli konnten die Widerlagerverformungen unter den verschiedenen Staumauerlasten ermittelt und deren Einfluss auf die Spannungsverhältnisse innerhalb der Staumauer berechnet werden.

Zum Auswertungsvorgehen sind folgende Bemerkungen anzubringen:

- die Annahme eines ebenen Belastungs- und Verformungszustandes dürfte den wirklichen Verhältnissen nicht genau entsprechen, da die Länge des Versuchsstollens nur 2.40 m beträgt. Es ist demnach anzunehmen, dass auch der mit der Elementenmethode erzeugte ebene Verformungszustand nicht unbedingt der Wirklichkeit entspricht. Daraus folgt die bedingte Anwendbarkeit der Formel (1). Eine Kombination der Elementen-Methode mit einer dreidimensionalen Rechenmethode (z. B. Tranter-Misterek) könnte zutreffendere Resultate liefern.
- eine zusätzliche Verbesserung der Auswertung mittels der Elementen-Methode könnte dadurch erreicht werden, dass die im Festgestein vorhandenen Spannungen den Spannungen zufolge der äusseren Lasten überlagert werden. Dies würde das versuchsmässige Bestimmen der im Festgestein nach erfolgtem Stollenausbruch vorhandenen Spannungen bedingen.
- die Einteilung und Unterteilung des Elementennetzes sollten den beobachteten Diskontinuitäten innerhalb des Festgestein Rechnung tragen. Damit wird die Spannungsverteilung wesentlich verändert.

Der Einfluss der lateralen Ausdehnung von Diskontinuitäten ist in diesem Zusammenhang jedoch schwer festzulegen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dem beschriebenen Versuchsvorgehen zuverlässige und relevante Messdaten erhalten werden. Die rechnerische Auswertung ist weiter zu verfeinern. Es muss nach weiteren Möglichkeiten gesucht werden, die beobachteten Verformungen in ihren plastischen und elastischen Anteil zu unterteilen und die Auswertung entsprechend durchzuführen.