

DREIAXIALE ANLAGEN ENTWICKELT AN DER BERGAKADEMIE FREIBERG, IHR GEBRAUCH UND DIE ERREICHTEN ERGEBNISSE

Heinz GLOTH

Bergakademie Freiberg, Freiberg/Sa, DDR

Schlüsselwörter: dreiaxiale Anlagen, der Porenraumdruck, das Steueraggregat

Dreiaxiale Anlagen sind für die geomechanischen Berechnungen bei Untergründarbeiten notwendig. Nach dem Experiment von V. Karman 1911 wurden die Anlagen weiterentwickelt. Die Anlage vom Beginn der 70-er Jahren ermöglichte die Gewinnung von den folgenden Indexen: die Axiallast vom Muster bis zu 2000 kN, der Seitendruck in der Kammer bis zu 400 MPa und der Porendruck im Muster bis 330 MPa. Der Einbau einer Thermoumhüllung für die Musterheizung bis zu 3000°C ist vorgesehen. Am Beginn der 80-er Jahren wurde in Freiberg eine Anlage mit elektronischer Steuerung hergestellt, die das Entstehen von 40 MPa vom Seiten- und Porendruck ermöglichte. Die Ergebnisse von den Experimenten mit diesen Anlagen sind auch dargestellt.

Die erste Veröffentlichung über Triaxialversuche von V. Karman trägt das Datum vom 21. Oktober 1911. Für seine Versuche setzte er die in Bild 1 dargestellte Triaxialkammer ein. In der Folgezeit wurde eine Vielzahl von Triaxialgeräten für unterschiedliche Belastungen entwickelt, die teilweise auch die Realisierung von Porenraumdrücken ermöglichen (Bild 2) (Gloth 1980).

Die Bedeutung der Triaxialversuche für den untertägigen Bergbau ist offensichtlich, wenn man bedenkt, daß durch geomechanische Fehleinschätzungen Menschenleben und Produktionseinrichtungen gefährdet werden. In der Tiefbohrtechnik haben die Triaxialversuche zur Gewinnung von Aussagen bezüglich der Standfestigkeit von Bohrungen lange Zeit nicht die ihnen gebührende Rolle gespielt. Gründe dafür sind darin zu sehen, daß einerseits bei Tiefbohrungen keine unmittelbare Gefährdung von Menschenleben bei einer geomechanischen Fehleinschätzung besteht und zum anderen der experimentelle Aufwand für die Durchführung von Triaxialversuchen relativ groß ist. Mit zunehmenden Bohrteufen ist es jedoch in verstärktem Maße zu geomechanisch bedingten Havarien gekommen, die nicht selten zur Aufgabe der Bohrung geführt haben. Diese Havarien führen durch ein Zusammenbrechen des Bohrloches zum Festwerden des Bohrstranges bzw. der Testgarnitur, zu Spülungsverlusten und zu Zerstörungen an den Futterrohren.

Da tiefe Bohrungen sehr kostenintensiv sind, ergab sich daraus folgerichtig die Forderung, auch zur Standfestigkeit von Bohrungen entsprechende

Ključne riječi: Triaksijalni uređaji, Tlak pornog prostora, Upravljačko računalo.

Triaksijalni uređaji neophodni su za geomehaničke proračune pri podzemnim radovima. Nakon pokusa V. Karmana u 1911. godini, nastavljena su usavršavanja uređaja. Uređaj iz početka sedamdesetih godina omogućio je dobivanje slijedećih pokazatelja: osno opterećenje uzorka do 2000 kN, bočni tlak u komori do 400 MPa i porni tlak u uzorku do 330 MPa. Predviđa se ugradnja termoomotača za grijanje uzorka do 300°C. Početkom osamdesetih godina načinjen je u Freibergu uređaj s elektroničkim upravljanjem koji omogućava ostvarivanje 40 MPa bočnog i pornog tlaka. U radu su opisani i rezultati pokusa ovim uređajima.

Untersuchungen anzustellen. Die gerätetechnische Basis zur Durchführung derartiger Versuche wurde an der Bergakademie Freiberg Anfang der 70er

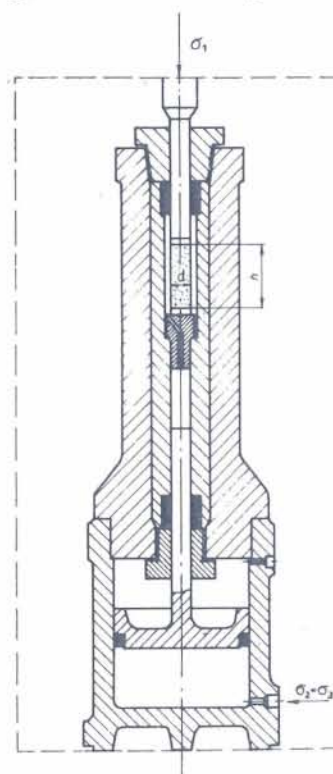


Bild 1: Karman-Kammer (1911) $\sigma_1 = 1000 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 600 \text{ MPa}$ (Gloth, 1980)

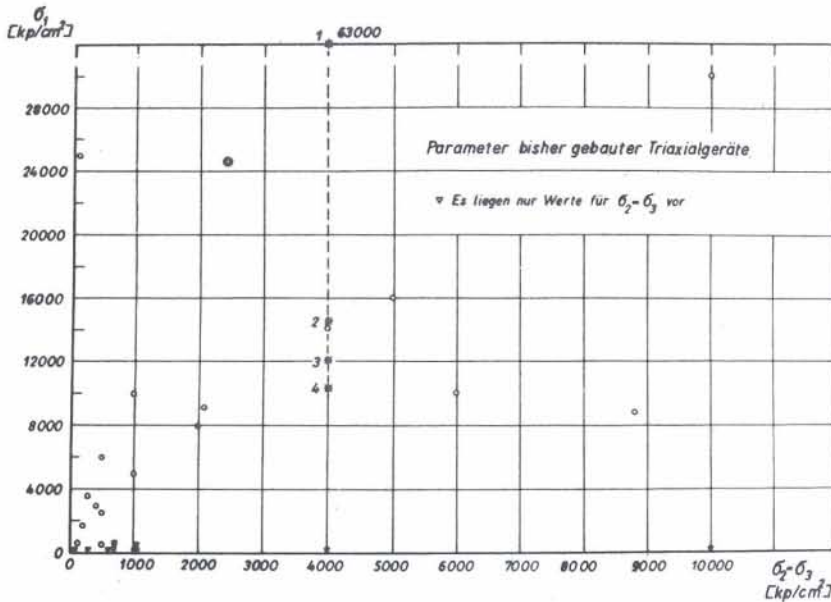


Bild 2: Mit bisher gebauten Triaxialgeraeten erreichbare Axialspannungen σ_1 und Manteldruecke $\sigma_2 = \sigma_3$ (Gloth, 1980).

Jahre durch den Bau eines Triaxialgeraetes geschaffen, das folgende Versuchsparameter ermoglicht:

- Axiale Belastung der Probe: 2000 kN
- Manteldruck ($\sigma_2 = \sigma_3$) der Kammer: 400 MPa
- Porenraumdruck im Probekoeper: 400 MPa

Durch Begrenzungen der Primaerhydraulik vor den Druckuebersetzern konnten bisher nur Mantel- und Porenraumdruecke bis 320 MPa realisiert werden.

Der Betrieb des Triaxialgeraetes erfolgt mit zwei Pumpenaggregaten. Eines der Pumpenaggregate erzeugt den Druckoelstrom fuer die Axialbelastung und das zweite Pumpenaggregat den Druckoelstrom fuer den Mantel- und Porenraumdruck. Zur Druckeroehung um den Faktor 10 sind fuer den Mantel- und Porenraumdruck zwei Druckuebersetzer angeordnet, Bild 3. Die Steuerung bzw. Regelung des Mantel- und Porenraumdruckes erfolgt vor den Druckuebersetzern auf der Niederdruckseite.

Die Anordnung der Triaxialkammer und des Hydraulikzylinders fuer die Axialbelastung im Aufnahmerahmen geht aus Bild 4 hervor. Der Hydraulikzylinder ist verschiebbar aufgehueingt, so dass der

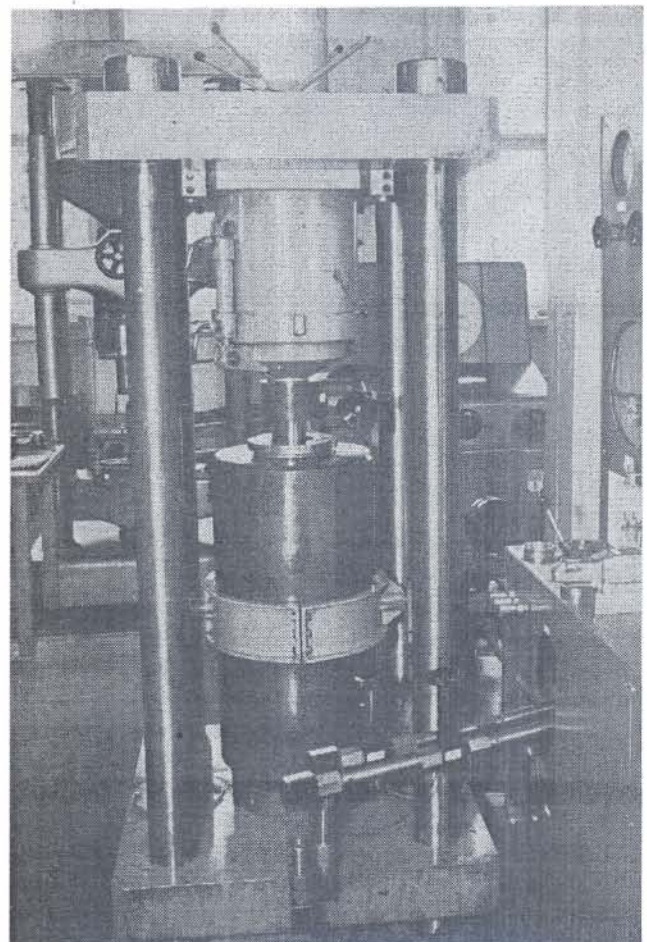


Bild 4: Gesamtansicht der Triaxialkammer mit Aufnahmerahmen und Druckstempel (Gloth, 1980).

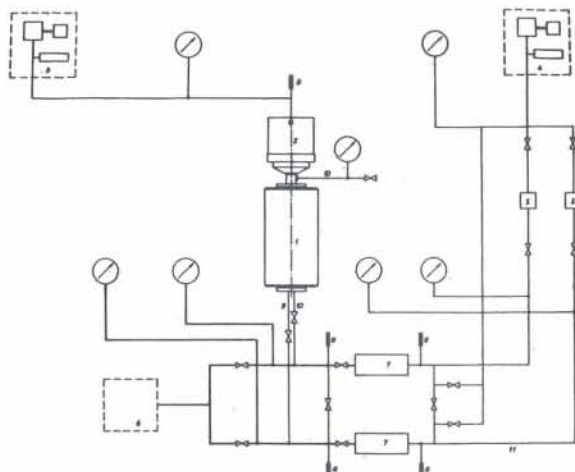


Bild 3: Vereinfachter Hydraulikschaltplan des Triaxialgeraetes (Gloth, 1980).

notwendige Freiraum fuer den Ausbau des Druckstempels aus der Kammer und fuer den Aus- und Einbau der Probe zur Verfuegung steht.

Einen schnitt durch die Triaxialkammer zeigt Bild 5. Der Druckraum der Kammer ist 350 mm lang und hat einen Durchmesser von 80 mm. Dieser Druckraumdurchmesser und der festgelegte Innendruck von 400 MPa bedingen die Ausfuhrung der

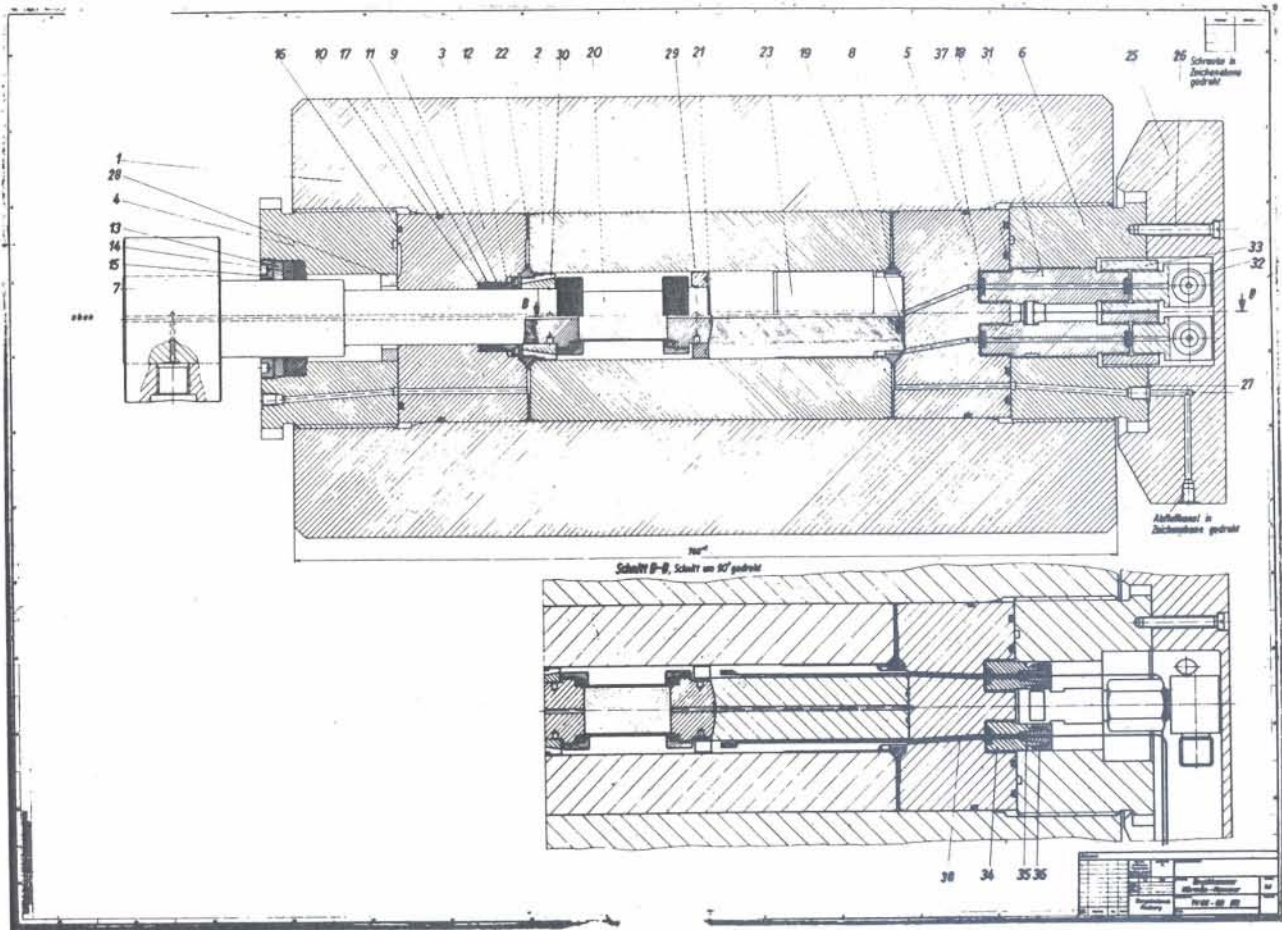


Bild 5: Triaxialkammer mit eingebauter Probe (Gloth, 1980).

Kammer mit doppelter Wandung. Der Innenmantel (2), dessen Bohrung den Druckraum darstellt, wurde zur Erzeugung einer definierten tangentialen Druckvorspannung an der gefährdeten Innenwand in den Aussenmantel (1) eingeschrumpft. Beide Mäntel sind aus einem hochlegierten Vergütungsstahl gefertigt worden. Der Abschluss des Druckraumes erfolgt beiderseitig durch entsprechende Stopfen (3 und 5), die durch Gewinderinge (4 und 6) fixiert werden (Bild 6). Die Abdichtung des Druckraumes erfolgt jeweils mit einer Radialdichtung aus Messing (8). Der in die Kammer hinein-

reichende Druckstempel (7) mit dem Porendruckkanal (Bild 7) wird im oberen Stopfen geführt. Im oberen Stopfen befindet sich auch das Dichtsystem für die Stempeldurchführung. Die Ummantelung des Probekörpers erfolgt mit Hilfe eines geeigneten Schlauchkörpers und mit verschraubbaren Anschlussstücken, die mit einer Kugelkalotte versehen sind, um eine einwandfreie Kräfteinleitung zu gewährleisten (Bild 8).

Die zu erfassenden Messgrößen bei der Durchführung von Triaxialversuchen sind die Längsdehnung (Bild 9), die Querdehnung und die Längsbelastung

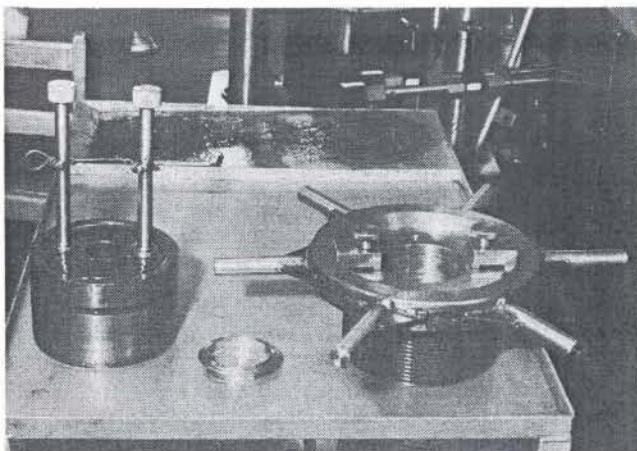


Bild 6: Oberer Stopfen, Radialdichtung und oberer Gewindering mit aufgesetztem Spezialschlüssel.

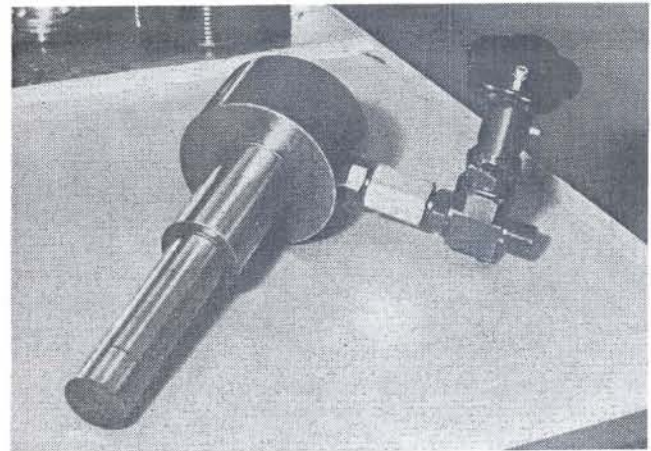


Bild 7: Druckstempel mit zentraler Bohrung und Absperrventil.

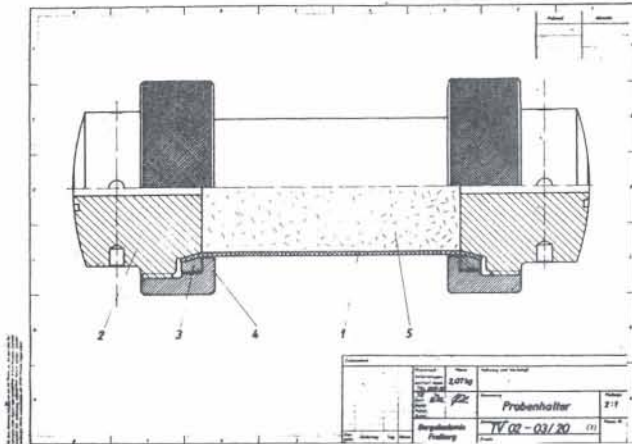


Bild 8: Probenhalter

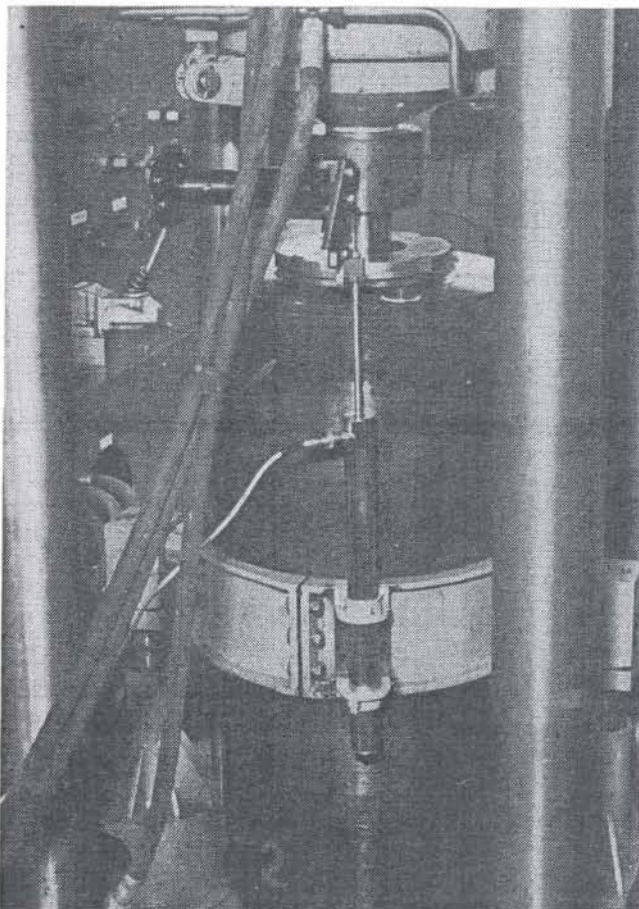


Bild 9: Messung der Längsdehnung der Probe mit einem induktiven Wegaufnehmer.

der Probe sowie der Mantel- und Porenraumdruck. Bei Einsatz eines Heizmantels ist das Aufheizen der Triaxialkammer bis max. 300°C geplant.

Mit der hier beschriebenen Triaxialkammer wurde eine Reihe von Versuchen mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt, so mit Postaer Sandstein, Granit, Zementstein und Speichergestein. Versuchsschwerpunkte waren das Verhalten dieser Materialien bei höheren Mantel- und Porenraumdrücken, das Festigkeitsverhalten nach vorheriger hydrostatischer Belastung ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), die Ermittlung des Entlastungskoeffizienten n von Postaer Sandstein

und die Untersuchung der Kompressibilität des Porenraumes von Speichergesteinen. Im Rahmen der Vorversuche mit Zementstein, wie er für die Ringraumzementation üblich ist, wurden durch punktförmige Undichtigkeit der Probenummantelung ungewollt Fracrisse erzeugt (Bild 10).

Im Rahmen von Triaxialversuchen mit dem Postaer Sandstein, der in der Praxis als Baumaterial verwendet wird (Zwinger in Dresden), wurde die Mohr'sche Bruchhüllkurve bei Manteldrücken bis 320 MPa ermittelt. Die Versuchsergebnisse belegen eindeutig, dass dieser Sandstein bei einer hydrostatischen Belastung ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) von etwa 400 MPa zu Sand zerdrückt wird (Bild 11).



Bild 10: Durch punktförmige Undichtigkeit der Ummantelung erzeugte Fracrisse (Gloth, 1980)

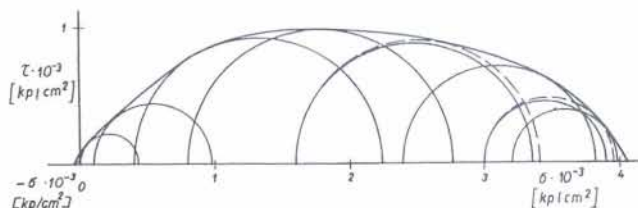


Bild 11: Bruchhüllkurve von trockenem Postaer Sandstein (Gloth, 1980)

Bei der Ermittlung des Entlastungskoeffizienten n , der wie folgt beschrieben werden kann,

$$\sigma_3 - n \cdot p_p = \sigma_{3\text{eff}}$$

σ_3 = Manteldruck in der Kammer

n = Entlastungskoeffizient

p_p = Porenraumdruck

$\sigma_{3\text{eff}}$ = effektiv zur Wirkung kommender Manteldruck (vgl. Bild 12)

wurden die in Bild 13 dargestellten Ergebnisse erzielt. Der Entlastungskoeffizient n ist nach den vorliegenden Ergebnissen sowohl vom Druck als auch von den Verformungseigenschaften des Gesteins abhängig und muss daher in Abhängigkeit von σ_3 und p_p ermittelt werden, wobei zu beachten ist, dass bei Triaxialversuchen mit Porenraumdruck < Manteldruck der Einfluss des Stützeffektes an den Bindemittelbrücken allein von der Höhe des Porenraumdruckes abhängt, der Einfluss der Verformungseigenschaften jedoch durch den effektiven Manteldruck, d. h. durch Manteldruck, Porenraumdruck und Entlastungskoeffizienten selbst, bestimmt

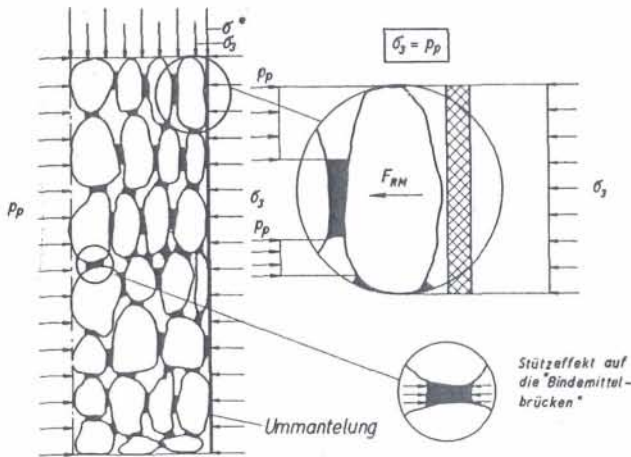


Bild 12: Darstellung des Stützeffektes auf die »Bindemittelbrücken« und der Entstehung der effektiven Horizontalspannung σ_{3eff} (Gloth, 1980)

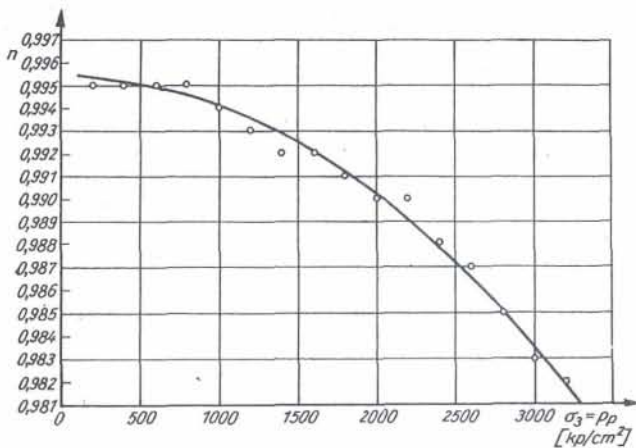


Bild 13: Entlastungskoeffizient n von Postaer Sandstein (Gloth, 1980)

wird. Der Entlastungskoeffizient n ist demnach eine vom Gesteinsaufbau und den Untersuchungsbedingungen abhängige komplizierte Grösse.

Anfangs der 80er Jahre wurde an der Sektion Geotechnik und Bergbau der Bergakademie Freiberg ein weiteres Triaxialgerät unter Einbeziehung eines Steuerrechners entwickelt und gebaut (Bild 14), das für jeweils 40 MPa Mantel- und Porenraumdruck ausgelegt ist. Das Schema der Messung und der Steuerelektronik kann Bild 15 entnommen werden. Das Gerät kann für eine Vielzahl von Untersuchungen und Messungen eingesetzt werden, so z. B. in der Gesteinsmechanik für die Bestimmung des Spannungs-Dehnungsverhaltens mit unterschiedlichen axialen und radialen Belastungen, die Bestimmung der inneren und äusseren Kompaktion von porösen Materialien durch alternierende Belastung und die gleichzeitige messung der Permeabilität zur Einschätzung der Veränderung der Fließbedingungen. Bei der Untersuchung von kohäsionslosem Material in der Bodenmechanik ist u. a. die Bestimmung der Kompaktion bei äusserer hydrostatischer Belastung und unter drainierten Bedingungen möglich sowie die Bestimmung der

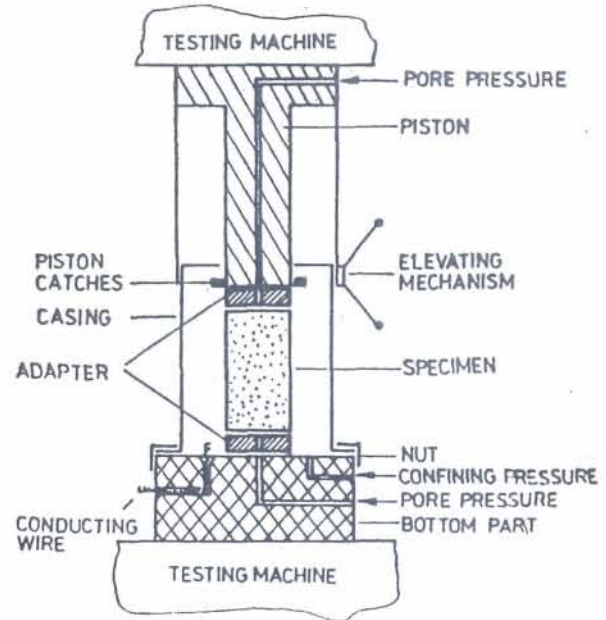


Bild 14: Schematische Darstellung des Triaxialgerätes für 40 MPa Manteldruck und 40 MPa Porenraumdruck (Braun, 1988)

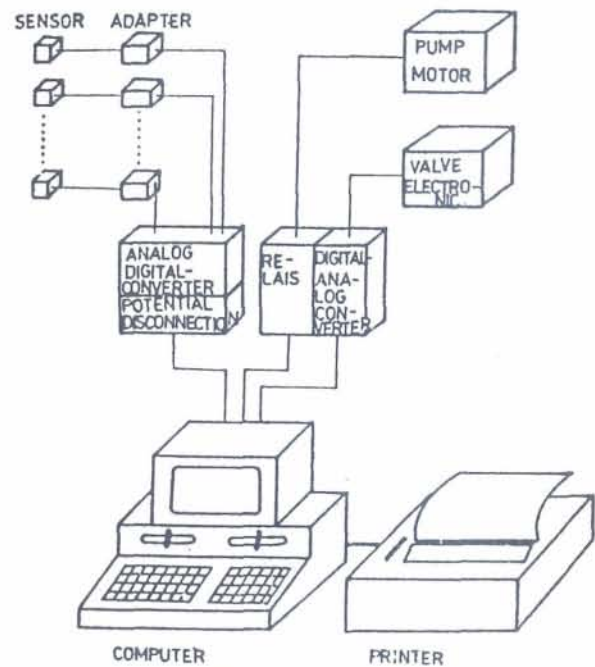


Bild 15: Schema der Messung und Steuerelektronik (Braun, 1988)

Wasserpermeabilität von unterschiedlichen Böden mit alternierender äusserer Belastung und Porenwasserdruck bei gleichzeitiger Messung des Probekörpervolumens, um die sich durch die Porendruckänderung ergebende Kompaktion zu charakterisieren.

Es wird daran gearbeitet, die bestehenden Versuchseinrichtungen ständig weiterzuentwickeln, um allen Anforderungen gerecht werden zu können.

Received: 14. III. 1990.

Accepted: 4. VI. 1990.

LITERATURVERZEICHNIS

- Braun, R. (1988): Compression cell and peripheral measuring equipment. — Gerlands Beitr. *Geophysik*, Leipzig 97, 3, S. 243 – 256
- Gloth, H. (1980): Entwicklung eines Triaxialgerätes für hohe Drücke und Durchführung von Festigkeitsuntersuchungen an Gesteinen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Porenraumdrücken. — *Freiberger Forschungshefte A 607*, — VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
- Karman, Th. v. (1911): Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. — *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 55 Heft 42, S. 1749 – 1757
- Sitz, P. ; Gloth, H. (1975): Geomechanische Probleme in der Tiefbohrtechnik und ein Beitrag zu ihrer experimentellen Lösung durch die Konstruktion eines Triaxialgerätes. — *Neue Bergbautechnik*, 5 Heft 3, S. 159

Triaksijalni uređaji razvijeni na Rudarskoj akademiji Freiberg, njihova upotreba i postignuti rezultati

H. Gloth

Prvo objavljivanje triaksijalnih pokusa v. Karmana nosi datum 21. listopada 1911. Uređaj je prikazan na sl. 1, a rezultati na sl. 2. Pri izradi bušotina značajno je poznavanje geotehničkih pokazatelja sa stanovišta sigurnosti i ekonomičnosti radova. Zato smo obavljali pokuse uređajima načinjenim na Rudarskoj akademiji u Freibergu početkom sedamdesetih godina (sl. 4). Ispitali smo Postaer pješčenjak, granit, cementni kamen i stijene nosioce fluida.

Rezultati su poslužili za utvrđivanje koeficijenta popuštanja η iz izraza:

$$\sigma_3 - \eta \cdot p_p = \sigma_{3\text{eff}}$$

gdje su:

σ_3 = bočni tlak u komori

p_p = porni tlak

$\sigma_{3\text{eff}}$ = efektivni djelujući bočni tlak (vidi sl. 12)

Rezultati utvrđivanja koeficijenta η vide se na sl. 13.

Početkom osamdesetih godina izrađen je u Sekciji geotehnike i rudarstva Rudarske akademije u Freibergu uređaj s elektroničkim upravljanjem predviđen za 40 MPa bočnog i pornog tlaka (sl. 14 i 15). Ovaj uređaj omogućava brojna izračunavanja u geomehanici:

- utvrđivanje odnosa naprezanja pri različitim osnim i radijalnim opterećenjima,
- utvrđivanje vanjske i unutrašnje zbijenosti šupljikavih materijala pri alternirajućim opterećenjima uz istovremena mjerenja propustljivosti,
- procjenjivanje promjena reoloških svojstava.