

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ

KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 68

Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit aus der Schweiz

von

W. H. MÜLLER und U. BRIEGEL

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Im Zusammenhang mit der Frage nach der Lagerung radioaktiver Brennstoffe ergab sich das Bedürfnis, das Deformationsverhalten von Anhydrit zu untersuchen. Mit ihren experimentellen Resultaten haben Herr W. Müller und Herr U. Briegel einen wichtigen Beitrag zur Kenntnis des Gefügeverhaltens von Anhydrit und zu baugeologischen Fragen geleistet. Die Kommission dankt den Autoren.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Verfasser allein verantwortlich.

Zürich, Dezember 1977

Der Präsident der
Schweiz. Geotechnischen Kommission

V. TROMMSDORFF

Eclogae geol. Helv.	Vol. 70/3	Seiten 685–699	12 Textfiguren und 1 Tabelle	Basel, November 1977
---------------------	-----------	----------------	---------------------------------	----------------------

Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit aus der Schweiz¹⁾

Von WALTER H. MÜLLER und UELI BRIEGEL²⁾

ABSTRACT

Compression tests on Anhydrite from 5 different sites in Switzerland revealed a strong dependence of strength with grain size. At room temperature the fine grained samples were stronger than the coarse grained ones, whereas at 400 °C the inverse happened. Thin section studies showed clear grainboundary migration only at 400 °C at high confining pressures (1.5 kb) and in the fine grained samples.

Einleitung

Seit 1972 ist am Geologischen Institut der ETHZ eine Triaxialpresse für Gesteinsdeformations-Versuche in Betrieb. Damit können wir das Verhalten kleiner Gesteinsproben unter Bedingungen studieren, wie sie in der Natur, z. B. bei tektonischen Bewegungen, vorkommen. Mit Ausnahme der Geschwindigkeit können alle Parameter geologisch realistisch gewählt werden. Da sich tektonische Vorgänge im Geschwindigkeitsbereich von Millimetern bis Zentimetern pro Jahr abspielen und unsere Proben im Vergleich zur Natur um einige Grössenordnungen kleiner sind, sind wir gezwungen, Laborversuche mindestens tausendmal schneller durchzuführen. Nun sind aber gewisse Deformationsmechanismen (z. B. Sprödbruch) nur schwach geschwindigkeitsabhängig, während im Bereich des Festkörperfliessens vorsichtige Extrapolationen möglich sind. Deshalb können wir trotz «Zeitmangel» wichtige und aufschlussreiche Resultate aus Laborversuchen erwarten. Zudem hat es sich erwiesen, dass – innerhalb gewisser Grenzen – erhöhte Temperaturen und raschere Deformationsraten vergleichbares Deformationsverhalten bewirken wie niedrigere Temperaturen und geologische Verformungsraten (z. B. HEARD & RALEIGH 1972).

Mit unserem Apparat können wir, bildlich gesprochen, eine Gesteinsprobe in eine Tiefe bis zu 20 km versenken. Dort herrscht ein lithostatischer Druck von etwa 5 kb und eine Temperatur von vielleicht 400 °C. Zusätzlich können wir noch einen beliebigen Porendruck ansetzen sowie auch einen gerichteten tektonischen Druck (σ_1) wirken lassen.

Den Anstoss zur Untersuchung von Anhydrit gab ein Auftrag der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) an unser Labor in Zusammenarbeit mit dem Geologischen Büro Prof. H. Jäckli, Zürich.

¹⁾ Beitrag Nr. 100 des Labors für Experimentelle Geologie.

²⁾ Geologisches Institut der ETH, ETH-Zentrum, 8092 Zürich, Schweiz.

Im Hinblick auf die massgebende Rolle von Anhydrit und Gips als Gleithorizonte bei Überschiebungen, z. B. im Jura, ist es von hohem Interesse, die bisher nur spärlich vorhandenen Daten (HANDIN & HAGER 1958; MÜLLER & SIEMES 1974) über diese Gesteine endlich zu vermehren.

Wir möchten an dieser Stelle dem Initianten und Förderer unseres Labors, Herrn Prof. K. Hsü, sowie auch den Miterbauern der Maschine, den Herren K. Ghilardi und Dr. K. Hoshino, und den Mitarbeitern H. Naef und J. Uttinger aufrichtig danken. Speziell für diese Arbeit sind wir Herrn Prof. H. Jäckli sehr zu Dank verpflichtet; nur seine Initiative ermöglichte die beschriebenen Untersuchungen.

Abkürzungen:

σ_1 = Grösster Hauptspannungsvektor

$\sigma_3 (= \sigma_2)$ = Manteldruck (σ_2 = mittlerer Hauptspannungsvektor; σ_3 = kleinster Hauptspannungsvektor)

ε = Verformung $\frac{\Delta l}{l_0}$ (l_0 = ursprüngliche Länge des Probenkörpers)

$\dot{\varepsilon}$ = Verformungsrate $\frac{\Delta l}{l_0 \cdot \text{sec}}$

Experimentelles Vorgehen

1. *Der Apparat:* Ein Triaxialapparat (Fig. 1) besteht aus einem möglichst steifen Rahmen (R) mit aufgesetztem Antrieb (A). Aufgabe des Antriebsteils ist es, einen Kolben [(1) in Fig. 2] entweder mit konstanter Geschwindigkeit in die Druckzelle (Z) hineinzupressen (konstante Verformungsrate) oder einen gewissen Druck auf den Kolben konstant zu halten (konstante Beanspruchung oder Kriechversuche). Unser Apparat ist für konstante Verformung gebaut und erlaubt Verformungsraten zwischen $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}$ bis $10^{-7}/\text{sec}$ bei der Probenlänge von 24 mm. Geologisch relevante Werte liegen bei 10^{-10} bis $10^{-14}/\text{sec}$. Die maximale Last auf den Kolben ist auf 20 Tonnen beschränkt.

Inmitten des Rahmens (R) steht die Druckzelle (Z), ein Stahlzylinder, der die hohen Manteldrucke von mehreren tausend Atmosphären aushalten muss. Für Versuche bis 400 °C kann noch ein Ofen (O) die Zelle umschliessen. Zwischen Kolben und Antrieb ist eine Last-Messdose (Dehn-Meßstreifen) angebracht, und zwischen Kolben und Druckzelle befindet sich ein Weggeber (LVDT), durch den die Kolbenbewegung relativ zur Druckzelle (Probenverformung) erfasst wird. Die Drehbewegung der Kugel-Umlaufspindel des Antriebes wird durch ein Gleitlager (G) aufgefangen.

Weiter werden zwei hydraulische Pumpsysteme gebraucht, um den Manteldruck (CP) und einen eventuellen Porendruck (PP) zu erzeugen; mit unseren Pumpen erreicht man maximal 7 kb.

2. *Die Druckzelle:* Figur 2 zeigt einen Schnitt durch die verwendete Zelle. Diese wurde bis jetzt noch nicht mit mehr als 5 kb belastet. Sie wurde aus dem Spezialstahl Söderfors Stora 67 gefertigt, ebenso die Verschraubungen. Der Kolben ist ein Drehling, der Amboss besteht aus Stora 25.

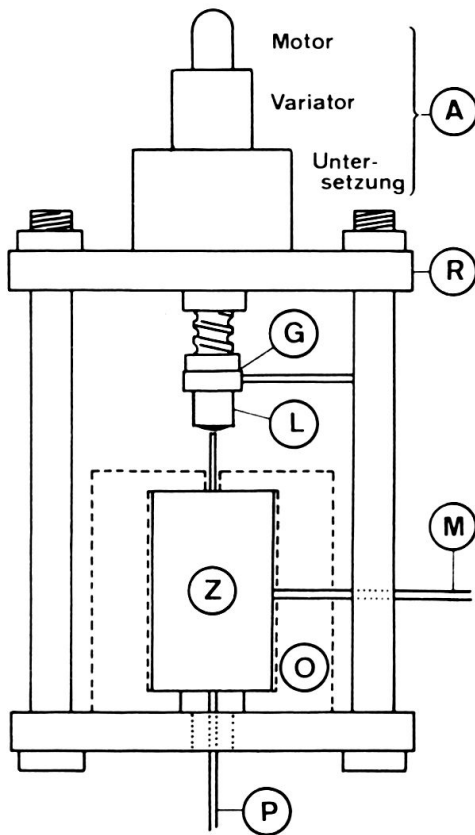


Fig. 1. Schematische Skizze des Deformationsapparates.

A = Antrieb, R = Rahmen (zwei quadratische Platten und vier Säulen), G = Gleitlager, L = Last-Messdose, M = Manteldruckzuleitung, Z = Druckzelle, O = Ofen, P = Porendruckzuleitung.

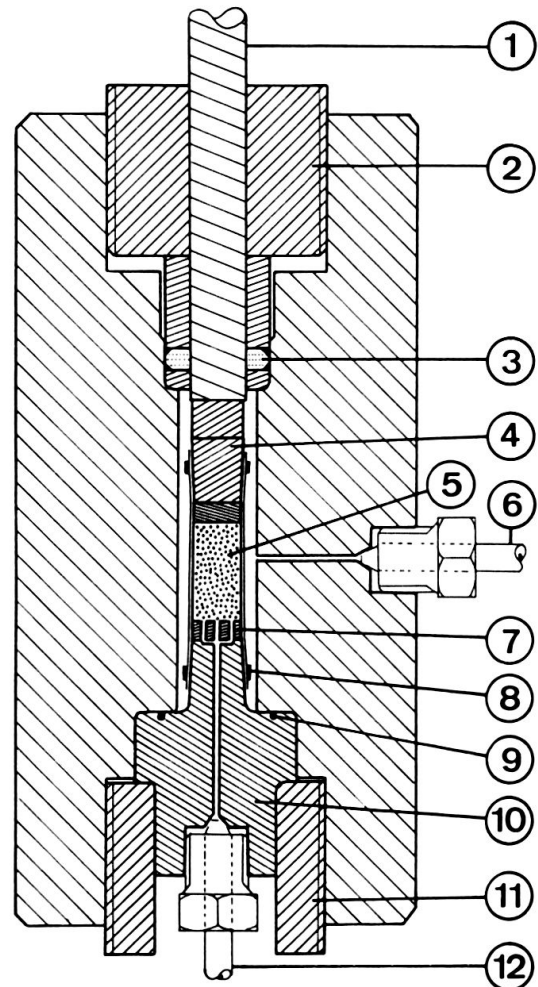


Fig. 2. Schnitt durch die Druckzelle.

1 = Kolben, 2 = obere Verschraubung, 3 = Kolbendichtung, 4 = oberes Konusstück, 5 = Probe, 6 = Manteldruckleitung, 7 = Lochplatte, 8 = unterer Spannring für Kupfermantel, 9 = Metall O-Ring, 10 = Amboss, 11 = untere Verschraubung, 12 = Porendruckleitung und/oder Thermoelement-Eingang.

3. *Die Probe:* Als Probe wird ein zylindrisches Gesteinsstück von 12 mm Durchmesser und 24 mm Länge verwendet. Es wird mit einem Diamantbohrer aus dem Handstück herausgebohrt, und die Zylinder-Endflächen werden planparallel auf 0,02 mm geschliffen. Die Probe wird gründlich entfettet und im Ofen bei 60 °C getrocknet. Für Porendruckversuche werden die getrockneten Proben für einige Stunden evakuiert, worauf dann das Vakuum mit Wasser abrupt gebrochen wird, damit die Probe sich umgehend vollsaugt; sie wird dann noch etwa eine Woche im Wasser gelagert. Kurz vor dem Montieren für einen Versuch wird die Probe genau ausgemessen. Die Probe [(5), Fig. 2] selbst wird in der Druckzelle von einem Kupferrohr der Wandstärke 0,15 mm umschlossen, damit kein Hydrauliköl in sie eindringt. Dieses Rohr wird mittels Spannringen (8) am Konusstück (4) und am Amboss (10) abgedichtet. Die Zwischenplatte über der Probe dient allein dem

Schutz des Konusstückes, die Lochplatte (7) unterhalb der Probe soll bei trockenen Versuchen die Drainage und bei Porendruckversuchen die Verteilung der Porenflüssigkeit besser gewährleisten.

4. *Der Versuchsablauf:* Nachdem die Probe in der Druckzelle montiert und letztere im Rahmen zentriert ist, wird der gewünschte Manteldruck erzeugt und manuell während des ganzen Versuches konstant gehalten. Parallel dazu wird der geforderte Porendruck hergestellt, der jedoch den Manteldruck zu keiner Zeit übersteigen darf, damit der Kupfermantel nicht platzt. Jetzt wird der Antrieb eingeschaltet und damit sukzessiv σ_1 erhöht, bis die Probe bricht oder eine bestimmte Verformung erreicht hat. Auf einem Mehrkanalschreiber werden ständig folgende Werte registriert: Last (σ_1) über die Last-Messdose, Verformung (ϵ) über den Weggeber, Manteldruck (CP) und Porendruck (PP) über Manometer (Bourdonrohre mit Weggebern) und die Temperatur an der Probenunterseite über ein Thermoelement (Cr-Al), welches durch die Porendruckleitung herausgeführt wird. Diese Aufzeichnungen werden dann mit dem Computer korrigiert. Beanspruchung und Verformung erfordern Korrekturen wegen der Apparaturverformung, der Kupferrohrverformung und der Durchmesseränderung der Probe während des Versuchs.

Das Resultat eines solchen Versuches ist ein Spannungs-/Verformungs-Diagramm (Fig. 4) bei einer gewissen Temperatur, einem gewissen Manteldruck und einem gewissen Porendruck bei einer bestimmten Verformungsrate. Erst eine ganze Versuchsserie gibt Aufschluss über ein Gestein.

5. *Reproduzierbarkeit:* Um unsere Apparatur zu testen, wurden Versuche dupliziert, wie sie an anderen Labors schon gemacht worden waren. Es wurde eine Versuchsreihe mit Proben aus Solnhofener Kalk unter gleichen Bedingungen

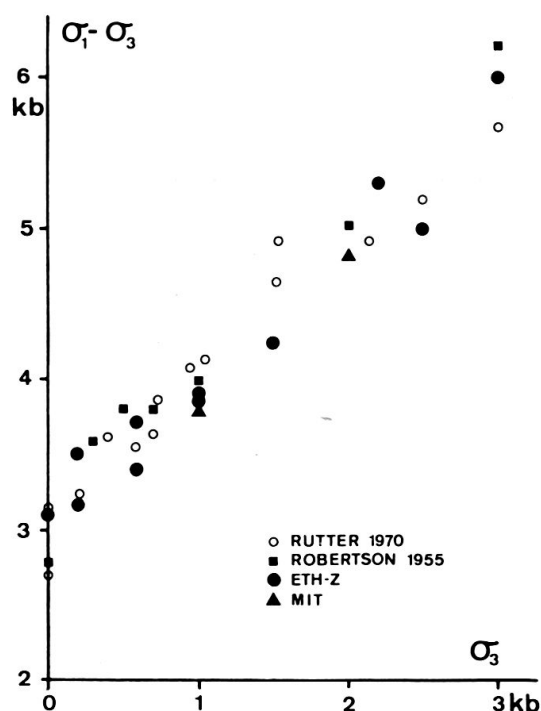


Fig. 3. Differenzspannungs-/Manteldruck-Diagramm für verschiedene Experimente an Solnhofener Kalk, ausgeführt in verschiedenen Labors mit verschiedenen Apparaten und auch (ausser MIT und ETH) verschiedenem Probenmaterial.

durchgeführt, wie sie RUTTER (1970) am Imperial College London in seiner Dissertation beschrieb. Figur 3 zeigt zum Vergleich diese Resultate in einem axialen Differenzspannungs-/Manteldruck-Diagramm. Zusätzlich sind hier noch Resultate von ROBERTSON aus den USA sowie 2 Punkte von der MIT, wo diese Versuche speziell für diese Arbeit gemacht wurden, eingezeichnet. In Anbetracht dessen, dass sowohl RUTTER wie auch ROBERTSON nicht dasselbe Ausgangsmaterial hatten wie wir (auch Solnhofener Kalk variiert natürlich bis zu einem gewissen Grad hinsichtlich Korngrösse, Porosität und Verunreinigungen), hält sich die Streuung in erstaunlich engem Rahmen.

Das Probenmaterial

Das untersuchte Probenmaterial stammt aus verschiedenen schweizerischen Lokalitäten, aus Bohrungen des Konsortiums Untertagespeicher, einer Bohrung der Vereinigten Schweizerischen Rheinsalinen und aus einem ehemaligen Gipsstollen. Im folgenden werden nun die bei den Experimenten verwendeten Anhydritgesteine beschrieben, wobei die mineralogischen Zusammensetzungen, welche durch röntgendiffraktometrische Untersuchungen von A. Stahel (Institut für Kristallographie und Petrographie der ETHZ) ermittelt wurden, aus der Tabelle ersichtlich sind.

Riburg (Tafeljura): Proben aus der Bohrung Nr. 51 der Vereinigten Schweizerischen Rheinsalinen. Bohrtiefe 196, 4–196,6 m.

Im Dünnschliff zeigt dieser Anhydrit intensiv ineinander verfilzte, stengelige Anhydritnadeln von einer durchschnittlichen Länge von 0,3 mm und einem Durchmesser von 0,05 mm. Die Struktur ist panidiomorph und die Textur massig. Neben Anhydrit (ca. 91%) findet man feinverteilten, seltener lagig angeordneten mikritischen Dolomit (ca. 5%) und wenig Gips (ca. 2–3%).

Wandflue (Tafeljura): Proben aus der Bohrung 4 der NOK 1971, Bohrtiefe 47,0–47,6 m.

Dieser Anhydrit zeigt im Dünnschliff faserige, verfilzte, stengelige Anhydritnadeln von einer durchschnittlichen Länge von 0,1 mm und einem Durchmesser von 0,05 mm. Er weist stellenweise eine gefaltete, schlierige Textur auf. Es scheint, dass dieses Gestein einer tektonischen Beanspruchung ausgesetzt war, die möglicherweise auf die Mettauer Überschiebung (WILDI 1975) zurückzuführen ist. Der hier ebenfalls vorkommende Dolomit (ca. 2–3%) ist wiederum feinverteilt (Korngrösse bis 0,1 mm), und der Gipsgehalt ist äusserst gering (ca. 0,5%).

Bohrung 4, Bohrtiefe 72,7–73,5 m.

Dieser Anhydrit-Typus wurde nur für die Anisotropie-Experimente verwendet. Er zeigt unter dem Mikroskop isometrische, parallel zur Lamination abgeplattete Kristalle und ein äusserst dichtes Gefüge. Die Korngrösse schwankt zwischen 0,01 und 0,05 mm, wobei das Mittel ungefähr bei 0,02 mm liegt. Die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen ergaben einen Anhydritgehalt von fast 100% neben ganz wenig Gips.

Bex (Ultrahelvetische Zone, Trias der Bex-Laubhorn-Decke): Proben aus der Bohrung 3 des Konsortiums Untertagespeicher 1974, Bohrtiefe 107,35–108,5 m.

Tabelle: Zusammenstellung der Laboruntersuchungen an Anhydrit

Ort		Val Canaria Stollen 33 m + 51 m	Airolo Bohrung 3 95,2 - 95,6 m	Bex Bohrung 3 107,35 - 108,50 m	Wandflue Bohrung 4 47,0 - 47,6 m	Riburg Bohrung 51 196,4 - 196,6 m
Gesteinsparameter (20°C)	Spez. Gew. g/cm ³	2,838	2,922	2,852	2,929	2,930
	Porosität in Vol.%	1,29	0,90	2,39	0,44	0,54
	E-Modul in Bar	190'000	90'000	290'000	120'000	260'000
	Winkel der inneren Reibung Ø	34°	31,2°	39,8°	29,8°	37,2°
	Kohäsion in Bar	165	130	145	430	420
Mineralbestand	Anhydrit *	59,9% ₍₁₎	75,6% ₍₂₎	75,4% ₍₁₎	95,0% ₍₂₎	90,8% ₍₂₎
	Gips * **	5% ₍₁₎	0,5%	2,0%	0,5%	2,5%
	Dolomit	5%	2,5%	-	2,5%	5%
	Magnesit	5%	2,5%	15%	-	-
	Quarz	-	-	5%	-	-
	Phlogopit	10%	10%	-	-	-
	Chlorit (Pennin)	-	2,5%	-	-	-
	Talk	10%	5%	-	-	-
Korngrösse des Anhydrits		mm	mm	mm	mm	mm
Durchschnitt		2 - 4	1-1,5	0,3-0,7	0,1Ø=0,05	0,3Ø=0,05
Extrem Werte		0,3-7	1-6	0,1-0,2	0,02-0,5	0,02-0,8
Mechanisch Wirksame		0,6	1	0,5	0,07	0,12

Für das Anhydrit-Gipsverhältnis beträgt der Fehler im 95% Vertrauens-Bereich ca. $\pm 3\%$

* Grad der Uebereinstimmung bei verschiedenen (röntgendiffraktometrischen) Messverfahren

(1) widerspruchsfrei

(2) geringe Unterschiede

** Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze (2,5% Gips)

Die übrigen Nebengemengteile wurden aus den Röntgenaufnahmen geschätzt

Das Anhydritgestein von Bex ist makroskopisch gebändert und brecciös. Der Schliff zeigt xenoblastische, isometrische Anhydritkörner von 0,3 bis 0,7 mm Grösse, die lagig angeordnet sind. Ganz vereinzelt sieht man polysynthetische Druck-Zwillingslamellen und Spaltflächen. Der Gips (ca. 2%) liegt als feinkörniges Granulat vor und ist in Zwickeln verteilt. Die mikritischen Karbonatkomponenten, bei welchen es sich nach den röntgendiffraktometrischen Aufnahmen um Magnesit handelt, sind leicht gerundet bis kantig. Daneben findet man noch Sandstein-Intraklasten und detritische Quarzkörner.

Val Canaria (Piora-Mulde): Proben aus einem 1931 erstellten Gipsstollen. Probenentnahme bei 33 m und 51 m Stollentiefe.

Airolo (Piora-Mulde): Proben aus der Bohrung 3 des Konsortiums Untertagespeicher 1974, Bohrtiefe 95,2–95,6 m.

Der Anhydrit aus der Piora-Mulde war einer starken postmetamorphen tektonischen Beanspruchung ausgesetzt. Dies zeigen die vielen Druck-Zwillingslamellen und die vielen Spaltflächen in den einzelnen ungleichkörnigen, xenoblastischen Anhydritkristallen. Die Klüfte und Spaltflächen sind mit einem dunklen Rekristallisationsgefüge ausgefüllt, bei dem es sich um Gips handeln dürfte. Das Karbonat (Dolomit und Magnesit) ist meist in Nestern angereichert (keine Druckzwillinge), tritt aber auch – ähnlich dem Quarz – poikiloblastisch in den Anhydritkristallen auf. Der Glimmer (Phlogopit) schmiegt sich oft eng an die Anhydritkristalle, ist aber häufig zusammen mit Chlorit (Pennin), Talk und Karbonat auch in Nestern angereichert. Vereinzelt findet man noch idiomorphe Pyritkristalle (<1 mm). Die Korngrösse der Anhydritkristalle aus dem Stollen in der Val Canaria ist deutlich grösser als jene von Airolo. Sie besitzen jedoch bedeutend mehr Spaltflächen, wodurch die effektiv mechanisch wirksame Korngrösse ($\sim 0,6$ mm) kleiner als die der Anhydrite von Airolo ($\sim 1,0$ mm) ist.

Resultate

Spannungs-/ Verformungs-Kurven bei Raumtemperatur

Die Ergebnisse der Experimente bei Raumtemperatur lassen ein sehr unterschiedliches mechanisches Verhalten der Anhydrite aus den verschiedenen schweizerischen Lokalisationen erkennen. Die Spannungs-/Verformungs-Kurven (Fig. 4 und 5) zeigen, dass der feinkörnige Anhydrit von Riburg eine bedeutend höhere Festigkeit aufweist als der grobkörnige Anhydrit aus dem Stollen der Val Canaria. Allgemein ist aus den Spannungs-/Verformungs-Diagrammen zu entnehmen, dass bei kleinen Manteldrücken der einfache Bruch vorherrscht. Das Gefüge des Gesteins wird nur unmittelbar, maßstabsbezogen in Bruchnähe, verändert. Diese Art von Verformung wird bei zunehmendem Manteldruck durch interkristalline Deformationsmechanismen oder kataklastisches Fliessen abgelöst. Dünnschliffuntersuchungen und Scanning-Aufnahmen zeigen, dass bei Verformungen über 15% eine durchgreifende Kornzerkleinerung entsteht, wodurch die Primärstruktur oft nicht mehr zu erkennen ist. Der Verformungsvorgang spielt sich an Korngrenzen, an Mikrorissen und entlang von Spaltflächen des gut spaltbaren Anhydrits ab. Bei

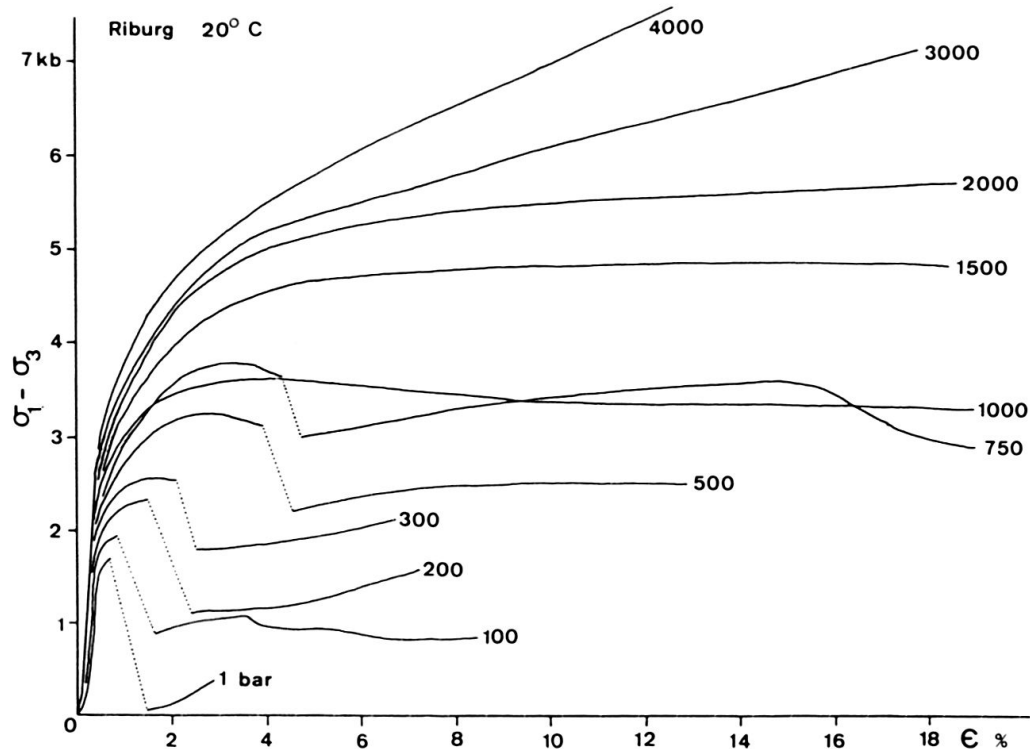


Fig. 4. Spannungs-/Verformungs-Diagramm für Manteldrucke von 1 bar bis 4000 bar bei Raumtemperatur und einer Verformungsrate von $4,5 \times 10^{-5}$ /sec des Anhydrits von Riburg.

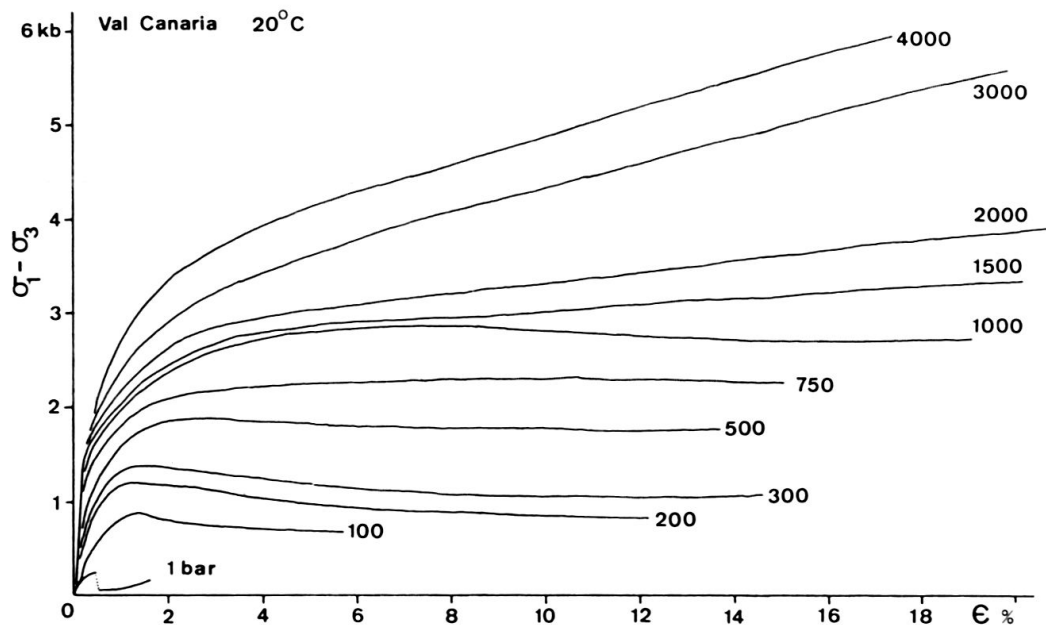


Fig. 5. Spannungs-/Verformungs-Diagramm für Manteldrucke von 1 bar bis 4000 bar bei Raumtemperatur und einer Verformungsrate von $4,5 \times 10^{-5}$ /sec des Anhydrits von Val Canaria.

über 1500 bar Manteldruck findet man vereinzelt Zwillingsbildungen und Translationen, wobei aber, wie auch bei noch höheren Manteldrücken, bei Raumtemperatur die Kataklase das vorherrschende Regime bezüglich der Deformationsmechanismen ist.

In Figur 6 ist die Festigkeit als Funktion des Manteldrucks bei Raumtemperatur aufgetragen. Die einzelnen Zeichen stellen bei Bruchverhalten jeweils die maximale Festigkeit dar, bei duktilem Verhalten wurde die Festigkeit, wie allgemein üblich, bei 10% Verformung vorgenommen. Aus diesem Diagramm ersieht man eine deutliche Festigkeitsabnahme in der Reihenfolge Riburg-Wandflue-Bex-Val Canaria-Airolo.

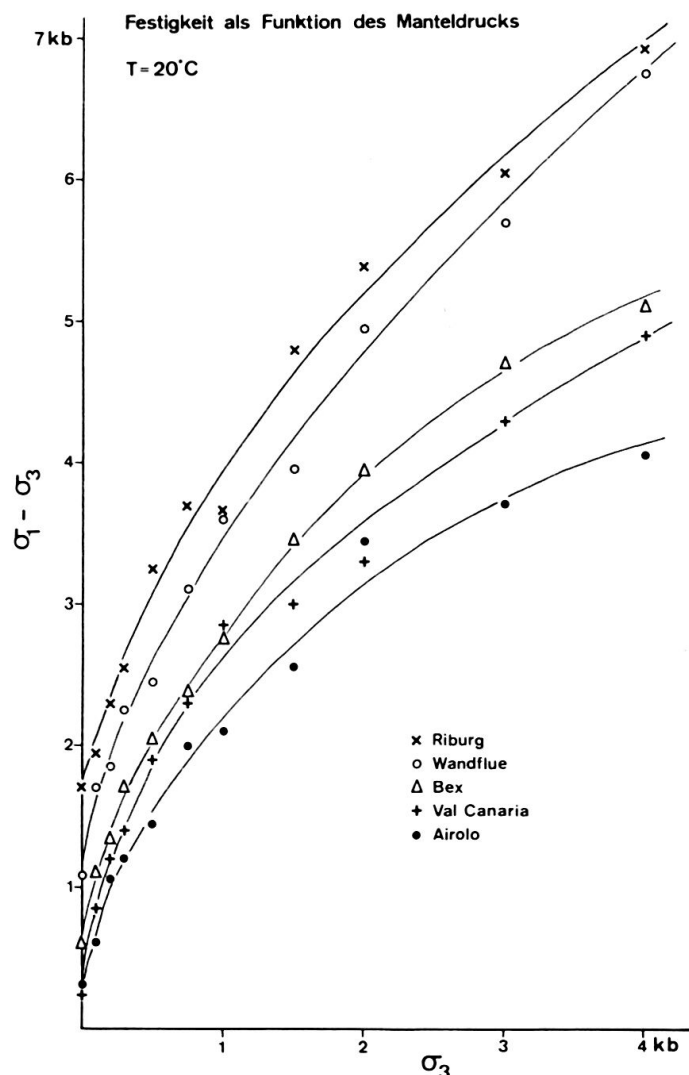


Fig. 6. Differenzspannungs-/Manteldruck-Diagramm bei Raumtemperatur und einer Verformungsrate von $4,5 \times 10^{-5}$ /sec des Anhydrits von 5 verschiedenen Lokalitäten. Jeder Punkt entspricht beim jeweiligen Experiment bei Bruch der maximalen Festigkeit oder bei duktilem Verhalten der Festigkeit bei 10% Verformung.

Spannungs-/Verformungs-Kurven bei 400 °C Umgebungstemperatur

Die Spannungs-/Verformungs-Kurven des feinkörnigen Anhydrits von Riburg bei einer Umgebungstemperatur von 400 °C liegen alle, mit Ausnahme der Kurve bei 1 bar Manteldruck, eng beisammen. Sie bilden ein eigentliches Band mit einer Bandbreite von ca. 0,5 kbar. Die zu erwartende Manteldruck-Abhängigkeit ist nur gerade noch bei der 1-bar- und 100-bar-Kurve zu erkennen. Bei den andern Kurven ersieht man keine unmittelbare Abhängigkeit mehr. Sie liegen innerhalb dieses relativ schmalen Bandes, dessen Breite auch etwa den Streubereich von Einzelversuchen wiedergibt.

Anders ist jedoch das mechanische Verhalten des grobkörnigen Anhydrits aus der Val Canaria. Hier ist die Manteldruck-Abhängigkeit noch deutlich erkennbar. Vergleicht man zudem die Kurven bei Raumtemperatur mit denen bei 400 °C Umgebungstemperatur, so stellt man fest, dass alle 20 °C-Kurven – mit Ausnahme der 3000-bar- und 4000-bar-Kurve – von den äquivalenten 400 °C-Kurven bei zunehmender Verformung geschnitten werden, d.h. dass dieser Anhydrit-Typus bei 400 °C Umgebungstemperatur im Bereich grosser Verformungen die grössere

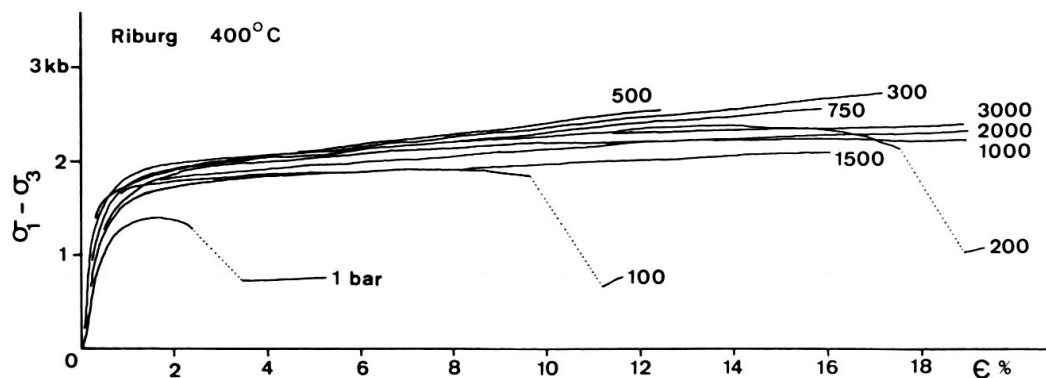


Fig. 7. Spannungs-/Verformungs-Diagramm für Manteldrucke von 1 bar bis 3000 bar bei 400 °C und $4,5 \times 10^{-5}$ /sec Verformungsrate des Anhydrits von Riburg.

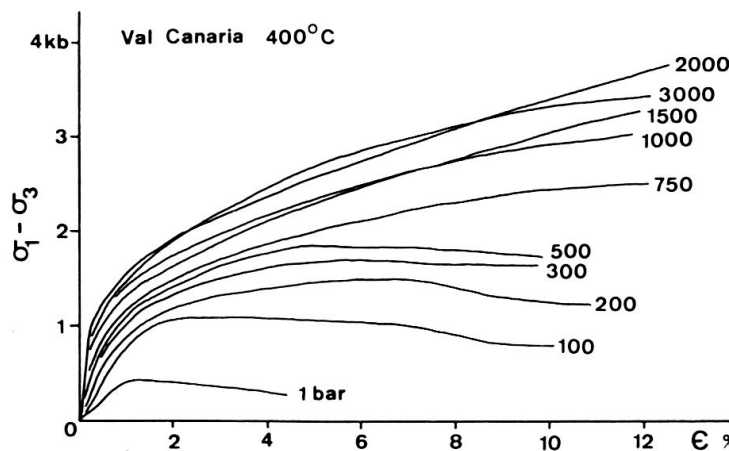


Fig. 8. Spannungs-/Verformungs-Diagramm für Manteldrucke von 1 bar bis 3000 bar bei 400 °C und $4,5 \times 10^{-5}$ /sec Verformungsrate des Anhydrits von Val Canaria.

Festigkeit aufweist als bei Raumtemperatur. Diesen Effekt hatten auch schon MÜLLER & SIEMES (1974) an den von ihnen untersuchten Anhydriten bei 300 °C Umgebungstemperatur festgestellt.

Aus Figur 9, die wie Figur 6 die Festigkeit als Funktion des Manteldrucks, aber diesmal bei 400 °C Umgebungstemperatur wiedergibt, ist ersichtlich, dass wir bei kleinen Manteldrücken (unter 500 bar) die gleiche Festigkeits-Reihenfolge haben, wie wir sie schon bei den Raumtemperatur-Experimenten erhielten. Bei höheren Manteldrücken bietet sich in bezug auf die Festigkeit allerdings das inverse Bild. Die grobkörnigen Anhydrite von Bex, der Val Canaria und von Airolo weisen in diesem Bereich eine deutlich höhere Festigkeit auf als die feinkörnigen von Riburg und der Wandflue. Dieser Wechsel im mechanischen Verhalten ist nur durch eine Änderung der Deformationsmechanismen zu verstehen. Bei Raumtemperatur und bei 400 °C Umgebungstemperatur, aber bei kleinen Manteldrücken, ist das vorherrschende Regime die Kataklastik oder die interkristallinen Gleitmechanismen, was auch erklärt, dass wir in diesem Bereich noch die gleiche Festigkeits-Reihenfolge wie bei Raumtemperatur haben. Intensive Verzwillingung mit Parkettmuster und durch Translationen verbogene Zwillinge treten indes erst bei den Experimenten mit 400 °C und einem Manteldruck von mehr als 300 bar auf. Aus den Dünnschliffen ist zudem zu erkennen, dass dieser Wechsel von interkristallinen zu intrakristallinen Deformationsmechanismen bei den feinkörnigen Anhydriten früher einsetzt als bei den grobkörnigen. Dies könnte auch die grosse Manteldruck-Abhängigkeit erklären, die wir noch bei 400 °C Versuchstemperatur bei den grobkristallinen Anhydriten festgestellt haben. Eine kürzlich publizierte Arbeit über Kalke (SCHMID 1976) zeigt gewisse Analogien mit unseren Beobachtungen an Anhydrit. Feinkörniger Solnhofener Kalk weist bei niedrigen Temperaturen eine viel grössere Festigkeit auf als der grobkörnige «Yule marble». Bei hohen Temperaturen ist jedoch die Festigkeit des «Yule marble» grösser.

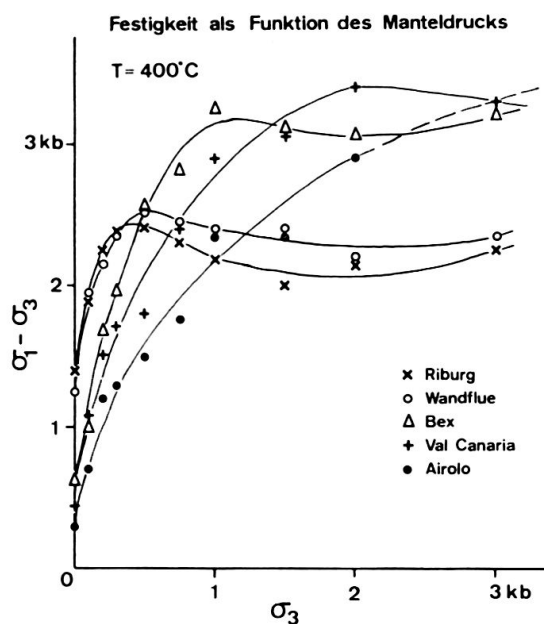


Fig. 9. Differenzspannungs-/Manteldruck-Diagramm bei 400 °C und sonst gleichen Bedingungen wie bei Figur 6.

Festigkeitsbestimmende Faktoren

Als wichtigste festigkeitsbestimmende Gesteinsfaktoren können folgende erwähnt werden, von denen aber nur die ersten drei im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet wurden:

- Mineralogische Zusammensetzung
- Korngrösse
- Gefüge
- Porosität
- Kristalldefekte (Wachstumsdefekte, Defekte entstanden durch äussere Beanspruchung und durch Strahlung)

Die mineralogische Zusammensetzung spielt normalerweise bei der Festigkeit der Gesteine eine entscheidende Rolle. In unserem Falle ergab sich jedoch, dass der Einfluss von Fremdkörnern im Anhydrit auf die Festigkeit klein war, dies vor allem wegen der viel höheren Fließbereitschaft des Anhydrits gegenüber den Karbonat- und Quarzkomponenten. Die Karbonatkristalle zeigten erst bei sehr hohem Druck und bei hoher Temperatur Anzeichen von Verformungen, wie z. B. Zwillingsbildungen. Ein Einfluss der anderen Nebengemengteile konnte allerdings in einigen wenigen Fällen beobachtet werden. So fand man bevorzugte Versetzungen entlang von Chlorit-Phlogopit-Talk-Zonen in den Anhydriten der Piora-Mulde.

Einen sehr wichtigen Faktor stellt hingegen die Korngrösse dar. Um dies zu verifizieren, ist in Figur 10 von jedem Experiment die Festigkeit in Abhängigkeit zur mittleren Korngrösse der jeweiligen Anhydritprobe aufgetragen. Bei den Experimenten, bei welchen ein Bruch entstand, wurde die jeweilige maximale Festigkeit genommen; bei duktilem Verhalten hingegen die Festigkeit bei 10% Verformung. Bei der Korngrösse musste berücksichtigt werden, ob die Kristalle intakt oder durch Spaltflächen und Risse durchzogen waren. So wurde eine mittlere, effektiv mechanisch wirksame Korngrösse ermittelt. Durch die zusammengehörenden Punkte (gleicher Manteldruck) wurde jeweils eine Kurve gelegt. Diese Kurven zeigen alle denselben Trend und verlaufen auch mehr oder weniger parallel zueinander. Sie weisen eindeutig auf eine Abhängigkeit der Festigkeit von der Korngrösse hin. Den gleichen gesetzmässigen Zusammenhang hatten auch Untersuchungen an Kalkgesteinen bei niedrigen Temperaturen ergeben (OLSSON 1974). Bei kleiner Korngrösse haben wir also, bei Kalk wie bei Anhydrit, im vorherrschenden Regime der Kataklase eine grosse Festigkeit, bei grobkristallinem Material aber eine kleine. Im Regime von intrakristallinen Gleitmechanismen, d. h. bei erhöhter Temperatur und Druck, tritt eine inverse Abhängigkeit ein, welche wiederum auch bei Kalksteinen aber in einem Bereich höherer Temperaturen nachgewiesen wurde (SCHMID et al. 1977).

Betrachtet man nochmals die Figur 10, so sieht man, dass einzelne erhaltene Punkte doch beträchtlich um die Kurve streuen. Ein Grund hierfür liegt im Gefüge des Gesteins. Um die Grössenordnung dieses Einflusses abzuschätzen, wurden an einem Anhydrit mit ausgeprägter Lamination der Lokalität Wandflue (Bohrung 4, Bohrtiefe 72,7–73,5 m) Anisotropie-Experimente gemacht. Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, wobei bei der einen die grösste Hauptspannungskompo-

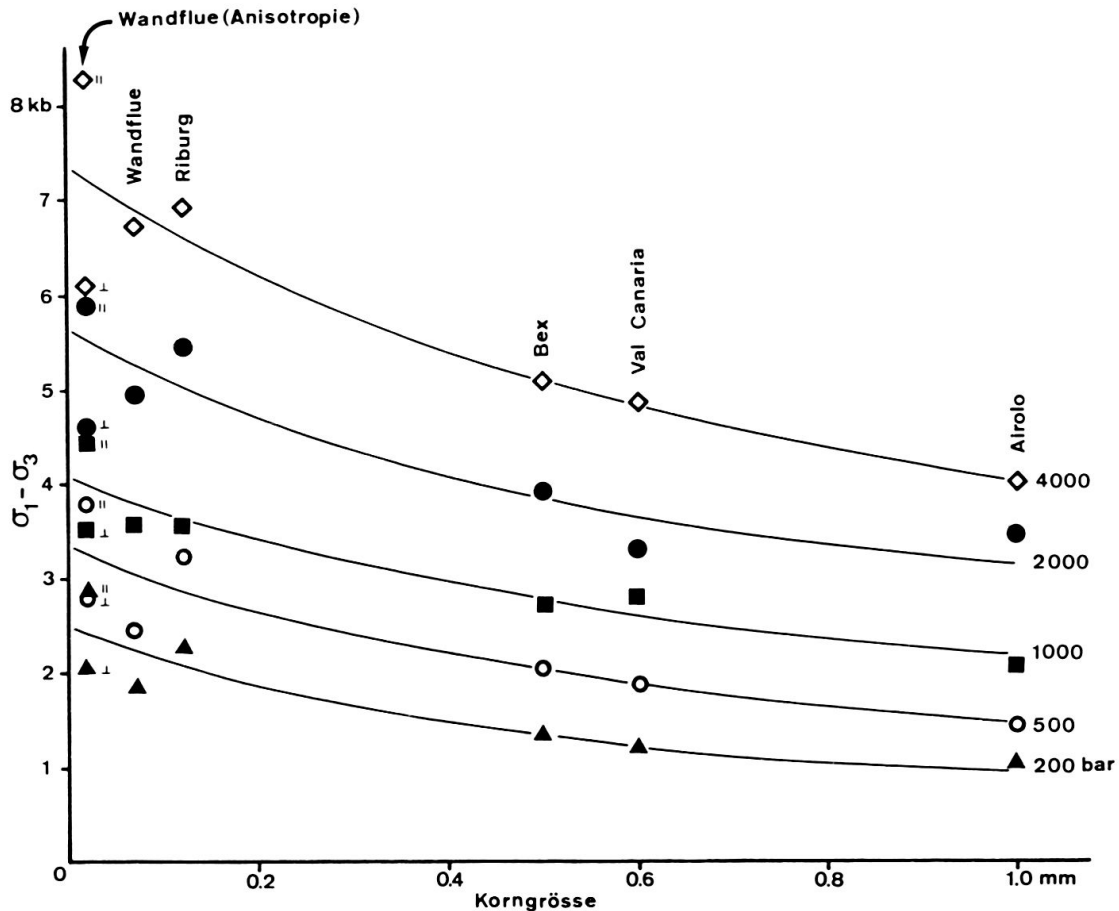


Fig. 10. Abhängigkeit der Festigkeit von der Korngrösse bei 20°C des Ausgangsmaterials. Die Punkte entsprechen der maximalen Festigkeit oder jenen bei 10% Verformung. Das Probenmaterial der Anisotropie-Versuche entstammt einer anderen Bohrtiefe als jenes der sonstigen Serie Wandflue und hat deshalb eine andere Korngrösse. Bei den Anisotropie-Versuchen sind pro Manteldruck je ein Experiment mit σ_1 parallel bzw. senkrecht zur Einregelung der Anhydritnadeln im Probenkörper berücksichtigt.

nente (σ_1) parallel und bei der andern senkrecht zur Lamination angesetzt wurde. Die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen ergaben fast 100% Anhydritgehalt nebst ganz wenig Gips. Unter dem Mikroskop zeigt dieser Anhydrit isometrische, parallel zur Lamination abgeplattete Kristalle und ein äusserst dichtes Gefüge. Die Korngrösse schwankt zwischen 0,01 und 0,05 mm, wobei das Mittel ungefähr bei 0,02 mm liegt. Vergleicht man nun die Ergebnisse dieser zwei Versuchsreihen (Fig. 11), so weisen sie ein deutlich verschiedenes Verhalten auf. Die Experimente der Serie I, bei welcher die grösste Hauptspannungskomponente parallel zur Lamination verläuft, zeigen im allgemeinen eine grössere Festigkeit als die der Serie II – ausser beim einaxialen Experiment. Hier findet sich bei der Serie II eine deutlich grössere einaxiale Druckfestigkeit. Betrachtet man nun das Gefüge, so bietet sich folgende mögliche Erklärung an: Die länglichen Anhydritkristalle stehen bei Serie I (Fig. 12) säulenartig in Richtung der grössten Hauptspannungskomponenten aufeinander. Da beim einaxialen Druckversuch kein Manteldruck dieses Gefüge zusammenhält, lassen sich diese Säulen leicht verbiegen, und es kommt

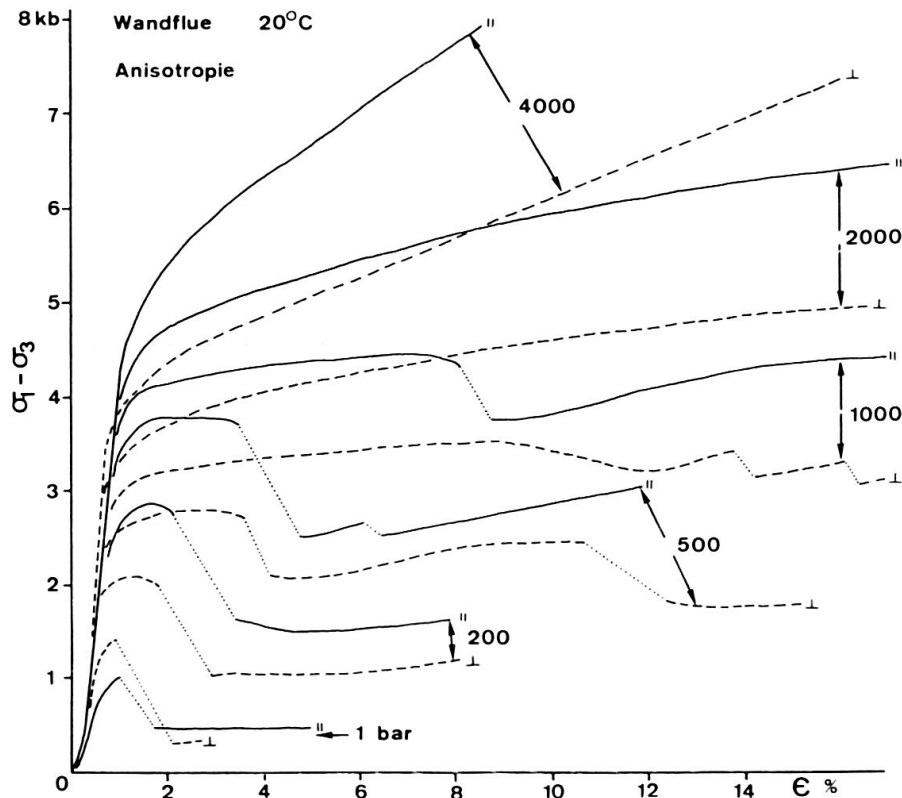


Fig. 11. Einfluss der Anisotropie auf die Festigkeit bei Raumtemperatur und verschiedenen Manteldrücken am Beispiel eines laminierten Anhydrits von der Wandflue. Das Spannungs-/Verformungs-Diagramm zeigt pro Manteldruck je eine Kurve bei σ_1 parallel bzw. senkrecht zur Lamination des Anhydrits.

schon bei geringem Energieaufwand zu Parallel-Brüchen in derselben Richtung. Das Gefüge der zweiten Serie ist durch die Drehung um 90° mit einem Backstein-Mauerwerk zu vergleichen. Hier benötigt man verständlicherweise eine grössere Energie, bis es bei dieser vorteilhaften Struktur zu Parallel-Brüchen kommt, wie sie beim einaxialen Druckversuch normalerweise auftreten. Mit zunehmendem Manteldruck zeigen die zwei Serien ein in bezug auf Festigkeit inverses Verhalten zueinander. Die Serie I weist nun die grössere Festigkeit auf, weil durch den Manteldruck ihre säulenartige Struktur stärker zusammengehalten wird, wogegen bei der Serie II genau das Gegenteil eintritt. Diese Erklärung ist jedoch nicht die einzig mögliche. Es wäre auch denkbar, dass der Einfluss der bevorzugten kristallographischen Einregelung, die sehr wahrscheinlich mit der Form-Einregelung zusammengeht, auch gross, wenn nicht bestimmend sein könnte.

Ein weiteres Beispiel bezüglich des Einflusses des Gefüges auf die Festigkeit bietet der Anhydrit von der Wandflue (Bohrung 4, 47,0–47,6 m). Er ist ein wenig feinkörniger als der Anhydrit von Riburg, weist aber trotzdem eine deutlich kleinere Festigkeit auf (Fig. 6). Seine Textur ist schlierenartig und fältelig mit teilweise eingeregelter Anhydritkristallen. An den Korngrenzen der eingeregelter Anhydritnadeln, welche in Richtung physikalisch bedingter Scherflächen ($30^\circ \pm 10^\circ$ gegen σ_1) liegen, kommt es schon im Anfangsstadium der Verformung zu kleineren Bewegungen, wodurch die Festigkeit vermindert wird. Der homogene Anhydrit von

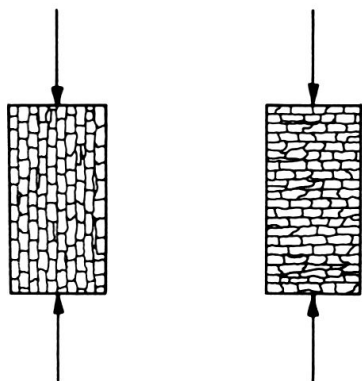


Fig. 12. Schematische Skizze von Schnitten durch den Probenkörper bei den entsprechenden Anisotropie-Versuchen.

Riburg hingegen mit seinen intensiv ineinander verfilzten Anhydritnadeln lässt im Anfangsstadium der Verformung keine grossen Bewegungen an Korngrenzen zu. Die aufgebrachte Energie wird innerhalb der einzelnen Anhydritnadeln durch eine elastische Deformation derselben gespeichert. Erst wenn das Spannungsfeld gross genug ist, die Bruchbedingung also überall erfüllt ist, kommt es zu einem jähen Bruch durch den Verlust der kohäsiven Bindungen.

LITERATURVERZEICHNIS

- HANDIN, J., & HAGER, R.V. (1958): *Experimental Deformation of sedimentary rocks under confining pressure: Tests at high temperature*. – Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol. 42, 2892–2934.
- HEARD, H.C., & RALEIGH, C.B. (1972): *Steady-state flow in marble at 500–800°C*. – Bull. geol. Soc. Amer. 83, 935–956.
- MÜLLER, P., & SIEMES, H. (1974): *Festigkeit, Verformbarkeit und Gefügeregelung von Anhydrit*. – Tectonophysics 237, 105–127.
- OLSSON, W.A. (1974): *Grain size dependence of yield stress in marble*. – J. geophys. Res. 79/32, 4859–4862.
- ROBERTSON, E.C. (1955): *Experimental study of the strength of rocks*. – Bull. geol. Soc. Amer. 66, 1275–1314.
- RUTTER, E.H. (1970): *An experimental study of the factors affecting the rheological properties of rock in simulated geological environments*. – Diss. Univ. London.
- SCHMID, S.M. (1976): *Rheological evidence for changes in the deformation mechanism of Solnhofen limestone towards low stresses*. – Tectonophysics 31, T21–T28.
- SCHMID, S.M., BOLAND, J.N., & PATERSON, M.S. (1977): *Superplastic flow in fine-grained limestone*. – Tectonophysics (im Druck).
- WILDI, W. (1975): *Die Mettaufer Überschiebung im Aargauischen Tafeljura*. – Eclogae geol. Helv. 68/3, 483–489.

