

Nagra

Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra

Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra

Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

TECHNISCHER BERICHT 90-17

LANGZEITQUELLENVERHALTEN VON TONGESTEINEN UND TONIGEN SULFATGESTEINEN

F. T. MADSEN
R. NÜESCH

JUNI 1990

ETH, Institut für Grundbau und Bodenmechanik,
Zürich

Erscheint gleichzeitig als
«**Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie, Lieferung 85**»
herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

und als
Mitteilung Nr. 140
des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Zürich

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

"Copyright (c) 1990 by NAGRA, Baden (Schweiz). / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Uebersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

ZUSAMMENFASSUNG

Sowohl bei Tongesteinen, wie beispielsweise Opalinuston, als auch bei Sulfatgesteinen ist nebst dem Überlagerungsdruck die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins von massgebender Bedeutung für das Quellverhalten.

Bei den Tongesteinen wächst das Quellpotential mit zunehmendem Tongehalt und der spezifischen Oberfläche des Tons. Quelldrücke grösser als 2MPa und Quellmasse grösser als 10% sind aber bei Tiefen bis 300m eher selten.

Bei den Sulfatgesteinen ist der Zusammenhang zwischen Quellverhalten und mineralogischer Zusammensetzung komplizierter, weil hier auch das Gefüge eine grosse Rolle spielt. Das Gefüge bestimmt den zeitlichen Verlauf und die Ausnützung des vorhandenen mineralogischen Quellpotentials.

Gesteine aus massigem Anhydrit sind nicht quellfähig. Anhydritgesteine mit einem Tongehalt von 5% verursachen schon Quelldrücke grösser als 1MPa (axiale Deformationen kleiner als 1%). Ein Maximum an Quellvermögen haben Gesteine mit einer Zusammensetzung von 10 bis 15% Ton und 70 bis 75% Anhydrit. Hier wurden Quelldrücke grösser als 4MPa gemessen (axiale Deformationen kleiner als 2,5%). Bei Proben mit einem Tongehalt grösser als 15%, resp. einem Anhydritgehalt kleiner als 70%, nimmt das Quellpotential wieder ab.

Das Quellmass tonhaltiger Anhydritgesteine ist direkt von der Menge des in Gips umgewandelten Anhydrits abhängig. Auch hier spielt der Tongehalt eine grosse Rolle. Gesteine ohne Ton (massiger Anhydrit) sind trotz Versuchsdauer von bis zu sechs Jahren nicht gequollen.

Je mehr Ton eine Ton-Anhydritprobe enthält, desto rascher wandelt sich der Anhydrit in Gips um. Bei Proben mit 5% Ton wurden nach einer Versuchsdauer von zwei Jahren schon Quellmasse grösser als 100% gemessen bei allseitig unbehinderter Quellung. Dabei wandelten sich 90% des Anhydrits in Gips um.

RESUME

La composition minéralogique des argiles, telles que "l'Opalinuston", mais aussi d'autres roches sulfatées, semble jouer un rôle aussi décisif que la pression de confinement lors de processus de gonflement.

Le potentiel de gonflement des argiles augmente avec leur contenu en argile et en fonction de leur surface spécifique. Par contre, il est rare de rencontrer des pressions de gonflement supérieures à 2MPa ainsi qu'une masse de gonflement excédant 10% à des profondeurs de moins de 300 mètres.

La relation entre la composition minéralogique et le gonflement des roches sulfatées est plus compliqué car la texture influence le potentiel de gonflement. La texture détermine l'évolution temporelle et l'utilisation du potentiel de gonflement des minéralogies en présence.

Les roches anhydritiques pures ne gonflent pratiquement pas. Par contre, les roches anhydritiques dont le contenu en argile dépasse 5% causent des pressions de gonflement excédant 1MPa (déformation axiale inférieure à 1%). Les roches se composant de 10 à 15% d'argiles et de 70 à 75% d'anhydrite présentent un potentiel de gonflement maximum. Dans ces cas, les pressions de gonflement excèdent 4MPa (déformation axiale inférieure à 2.5%). Lorsque le contenu en argile dépasse 15% et que celui de l'anhydrite est plus bas que 70%, le potentiel de gonflement diminue à nouveau.

Le volume de gonflement des roches anhydritiques contenant des argiles est directement proportionnel à la quantité d'anhydrite se transformant en gypse. Dans ce contexte, le contenu en argile joue aussi un rôle important: des échantillons sans argiles ne gonflent pas, même sur une durée de six ans.

Plus un échantillon d'anhydrite argilifère contient d'argile, plus la transformation d'anhydrite en gypse se fait rapidement. Après 2 ans et en l'absence de toutes contraintes, des échantillons contenant 5% d'argile présentent un volume de gonflement supérieur à 100% alors que 90% de l'anhydrite s'est transformé en gypse.

SUMMARY

The swelling behaviour of shales such as the Opalinum Clay, and of clay-containing sulfate rocks, is, in addition to the influence of the overburden pressure, mainly dependent on the mineralogical composition of the rock.

The swelling potential of shales increases with increasing content and specific surface area of the clay. Swelling pressures greater than 2MPa and swelling strains greater than 10 percent are usually not encountered above depths of up to 300m below the ground surface.

The relationship between the swelling behaviour of clay-sulfate rocks and their mineralogical composition is more complicated than that of pure clays. In those rocks which contain anhydrite, the texture determines the time-swelling behaviour and the development of the mineralogical swelling potential.

Rocks containing only anhydrite do not swell, whereas, rocks containing 5 percent clay may develop a swelling stress of more than 1MPa for axial strains less than 1 percent. The maximum swelling potential was found in rocks containing 10 to 15 percent clay and 70 to 75 percent anhydrite. With this latter composition, a swelling stress greater than 4MPa was determined for axial strain less than 2.5 percent. Samples containing more than 15 percent clay tended to show a smaller swelling potential.

The swelling strain of clay-sulfate rock depends on the quantity of anhydrite which is converted into gypsum. The clay content also plays an important role. Rock without clay shows no swelling strain, even after a testing period of six years.

Samples with a higher clay content exhibit a faster conversion of anhydrite into gypsum than do samples with a smaller amount of clay. The swelling strain of samples containing as little as 5 percent clay was more than 100 percent after a testing period of two years. During this period 90 percent of the anhydrite was converted into gypsum.

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
	ZUSAMMENFASSUNG, RESUME, SUMMARY	I
1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	QUELLMECHANISMEN	2
3	PROBENMATERIAL	6
4	MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGSMETHODEN	9
5	ERGEBNISSE DER MINERALOGISCHEN UNTERSUCHUNGEN	15
6	VERSUCHSANORDNUNG UND METHODIK DER QUELLVERSUCHE	28
7	ERGEBNISSE DER QUELLVERSUCHE	36
8	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	46
9	LITERATURVERZEICHNIS	51

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Seit dem Beginn des Tunnelbaus in grösserem Umfang vor über 100 Jahren sind die Probleme bekannt, welche durch quellfähige Gesteine im Untertagebau verursacht werden. Dabei handelt es sich in der Schweiz vor allem um tonhaltige Gesteine des Mittellandes und der Juraketten. Im Jura sind auch die Evaporite der Trias quellfähig. Als Vertreter der Tongesteine seien hier die Molassemergel und der Opalinuston genannt und bei den Evaporiten vor allem die tonigen Sulfatgesteine (Anhydrit-Tongesteine) des Gipskeupers und der Anhydritgruppe.

Bis vor kurzem wurden von der NAGRA mögliche Endlager für hochradioaktive Abfälle vor allem in kristallinen Gesteinen der Nordostschweiz evaluiert. Die Untersuchungen wurden in den letzten Jahren aber auch auf Sedimentgesteine wie diejenige der Unteren Süsswassermolasse und des Opalinustons ausgedehnt. Unabhängig davon, ob jetzt ein Endlager im kristallinen Grundgebirge der Nordostschweiz oder in den obenerwähnten Sedimentgesteinen zur Ausführung kommt, müssten Bauwerke wie Schächte, Stollen oder Kavernen teilweise oder ganz in quellfähigen Gesteinen ausgeführt werden. Bei einem Endlager im Kristallin müsste z.B. der Schacht zum Endlager durch sämtliche mesozoischen Sedimentgesteine abgeteuft werden. Vom Tunnel-, Kavernen- und Stollenbau her sind einige dieser Gesteine als quellfähig bekannt und haben grosse Schäden verursacht. Die Schäden sind dabei nicht nur in den älteren Eisenbahntunnels, wie z.B. dem Bözbergtunnel (Beck und Golta 1972), sondern auch in den neueren Autobahntunnels wie dem Belchentunnel, aufgetreten.

Aus Langzeitbeobachtungen (Beck und Golta 1972) ist bekannt, dass die Schäden, verursacht durch Sohlhebungen und Widerlagerverengungen, nicht nur in der Bauphase auftraten, sondern dass die Bewegungen auch hundert Jahre nach Erstellung des Bauwerks weitergehen können. Das Langzeitquellverhalten dieser Gesteinstypen ist deshalb für die Ausführung und Dimensionierung der Bauwerke in Verbindung mit einem Endlager von grosser Bedeutung.

Dieser Bericht befasst sich mit dem Quellverhalten des Opalinustons und verschiedenen tonigen Sulfatgesteinen aus der Schweiz und Österreich.

Dank dem Entgegenkommen der Vorarlberger Illwerke, Schruns, konnten in diesem Bericht auch die Untersuchungen der tonhaltigen Sulfatgesteine (Oberostalpin) aus dem Projekt Walgauwerk, Valkastielstollen, mitberücksichtigt werden.

2 QUELLMECHANISMEN

Das Quellen kann wie folgt beschrieben werden:

Die Quellung eines Gesteins ist eine zeitabhängige Volumenzunahme, welche auf einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser beruht.

Der Quellmechanismus ist eine Kombination der physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser und einer Spannungsverminderung, wobei erstere normalerweise die Hauptbeteiligte an der Quellung ist. Der Quellprozess tritt aber nur gleichzeitig mit einer Spannungsverminderung auf oder folgt dieser unmittelbar anschliessend.

2.1 Tonquellung

Die Tonquellung resultiert aus der Anlagerung von Wasser an Oberflächen der Tonminerale im Gestein. Die Tonminerale sind sehr klein ($<2\mu\text{m}$) und meistens plättchenförmig. Sie können grob in zwei Klassen unterteilt werden:

- quellfähige Tonminerale
- nicht quellfähige Tonminerale

Der Unterschied zwischen diesen beiden Haupttypen liegt in der für das Wasser zugänglichen Oberfläche der Minerale. Diese liegt bei den quellfähigen Tonmineralen, wie z.B. Smektit (Montmorillonit), in der Grössenordnung von 700 bis 800m²/g Ton. Bei den nicht quellfähigen Mineralen (z.B. Kaolinit oder Illit) beträgt die von Wasser belegte Oberfläche 10 bis höchstens 100m²/g Ton. Bei den Mixed-layer Mineralen wie z.B. Illit/Smektit liegt die Oberfläche zwischen dem des Illits und des Smektits.

Nebst anderen Faktoren, wie z.B. dem Überlagerungsdruck, hängt das Quellpotential eines Gesteines vor allem von der Grösse der für Wasser zugänglichen Oberfläche ab. Auch Gesteine mit ausschliesslich nicht-quellfähigen Tonmineralen quellen, nur eben in einem geringeren Umfang. Die Ansicht, dass nur Gesteine mit quellfähigen Tonmineralen quellfähig seien, ist deshalb falsch.

In Sedimentgesteinen sind die Tonteilchen als Folge der Gesteinsgenese mehr oder weniger parallel eingeregelt. Dabei liegen die Plättchen mit der Fläche senkrecht zur Richtung der Hauptspannung, welche bei der Genese vorherrschend war. Die grössten Quellparameter (Quelldruck, Quellhebung) werden denn auch senkrecht zur Schichtung der Gesteine gemessen.

Der Quellvorgang, welcher unter oberflächennahen (<500m) Bedingungen (Tunnelbau) im Gebirge wirkt, wird als osmotische Quellung bezeichnet, weil Unterschiede in Ionenkonzentrationen als treibende Kraft wirken. Wenn das Gestein durch den Vortrieb eines Tunnels entlastet wird und Wasser zur Verfügung steht, wird es durch Osmose Wasser aufnehmen und dadurch sein Volumen vergrössern. Die Vergrösserung bei unbehinderter Quellung kann bis zu 20Vol% betragen, je nach Gesteinstyp und Überlagerungsdruck.

Der Volumenvergrösserung infolge Wasseraufnahme kann mittels eines äusseren Druckes entgegengewirkt werden (Fig.1). Aus theoretischen Überlegungen (Madsen 1976 und Madsen and Müller-Vonmoos 1985) wurde abgeleitet, dass der Quelldruck, den ein Tongestein aufbauen kann, im wesentlichen von folgenden zwei Grössen abhängig ist:

- dem Abstand zwischen den Tonteilchen oder zwischen den Elementarschichten bei den quellfähigen Tonmineralen
- der Wertigkeit der Kationen in der Flüssigkeit nahe der Tonoberfläche und im Porenwasser des Gesteins.

Die Abhängigkeit des Quelldrucks σ von diesen Parametern, kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sigma = \frac{K}{d^2 \cdot v^2}$$

wobei K eine Konstante ist, d dem halben Abstand zwischen den wasserbelegten Oberflächen entspricht und v die Wertigkeit darstellt.

Die Ionenkonzentration im Porenwasser des Gesteins spielt eine untergeordnete Rolle. Dies, weil die durch die negative elektrische Ladung der Tonteilchen gebundene Kationenkonzentration c_1 (Fig.1) viel grösser ist als die Kationenkonzentration c_2 im Porenwasser.

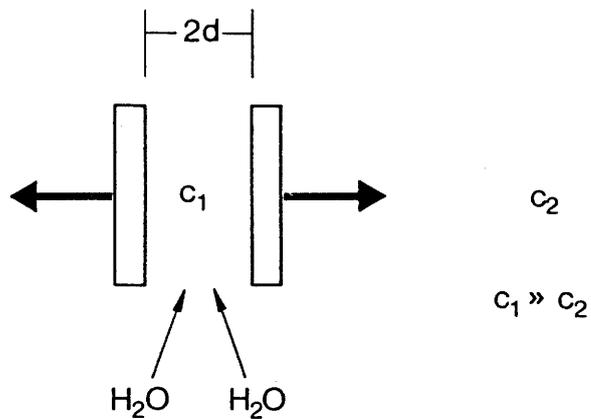


Fig. 1a: Bei der unbehinderten, freien Quellung können sich die Tonteilchen ohne Gegendruck voneinander weg bewegen.

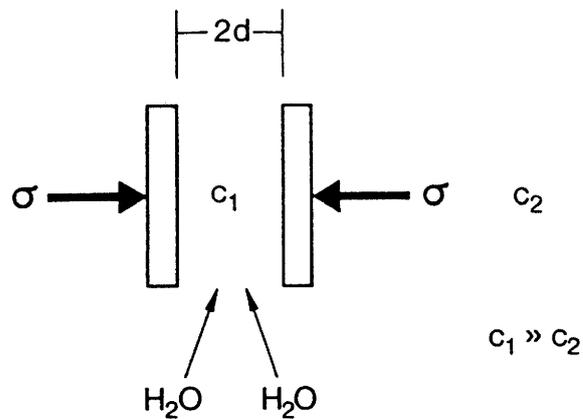


Fig. 1b: Bei der behinderten Quellung werden die Tonteilchen durch einen Gegendruck an Ort gehalten.

Aus obiger Formel ist ersichtlich, dass eine kleine zugelassene Quellhebung (Vergrößerung von d) eine erhebliche Reduktion des Quelldrucks zur Folge hat. In Übereinstimmung mit der Formel weisen Gesteine, welche hauptsächlich einwertige Kationen im Porenwasser enthalten (Natrium-Ionen), höhere Quelldrücke auf als Gesteine mit zweiwertigen Kationen (Kalzium oder Magnesium-Ionen), (Madsen 1979).

2.2 Anhydritquellung

Bei der Anhydritquellung handelt es sich um eine chemische Reaktion, durch welche sich der Anhydrit durch Aufnahme von zwei Wassermolekülen in Gips umwandelt.



Dabei geht der orthorhombische Anhydrit in monoklinen Gips über, und es ergibt sich daraus im offenen System (Wasser wird von aussen zugeführt) eine Volumenzunahme von maximal 61%. In einem geschlossenen System resultiert hingegen eine Volumenabnahme von 9.8%.

Dieser Prozess ist unter oberflächennahen, im Tunnel vorkommenden Bedingungen nicht reversibel. Der Umwandlungsprozess verläuft vermutlich über eine Auflösung des Anhydrits mit nachfolgender Ausfällung des Gipses. Die Löslichkeit von Anhydrit in reinem Wasser bei 25°C beträgt nach Posnjak (1938) etwa 2.7g/L. Bei Erreichen einer CaSO_4 -Konzentration von ca. 2.4g/L (25°C) beginnt Gips auszukristallisieren. Die Gipsausfällung vermindert die Konzentration der Lösung und bewirkt weiteres Auflösen von Anhydrit. Dadurch wird die Gleichgewichtskonzentration für Anhydrit nie erreicht, und der Umwandlungsprozess bleibt im Gange, bis der gesamte Anhydrit gelöst ist.

Bei massigen Anhydritgesteinen kann die Umwandlung in Gips extrem lange dauern. Dies ist bedingt durch die sehr geringe Durchlässigkeit des massigen Anhydrits. Der gelöste Anhydrit kann im Gebirge durch zirkulierendes Wasser weggeführt werden, und es entstehen die Auslaugungerscheinungen (Gipskarst) in Sulfatgesteinen.

Bei Anhydritgesteinen, welche Lagen, Schlieren oder Linsen von Ton enthalten, wird die Umwandlung von Anhydrit in Gips beschleunigt. Einerseits wird dies dadurch erklärt, dass Ton dem massigen Anhydrit das schwach adsorbierte Wasser anbieten kann. Andererseits könnte der Ton durch Ionenaustausch auch als Katalysator bei der Umwandlung wirken. Die Anwesenheit von Salzen in geringer Konzentration beschleunigt die Umwandlung von Anhydrit in Gips (Müller und Briegel 1977).

3 PROBENMATERIAL

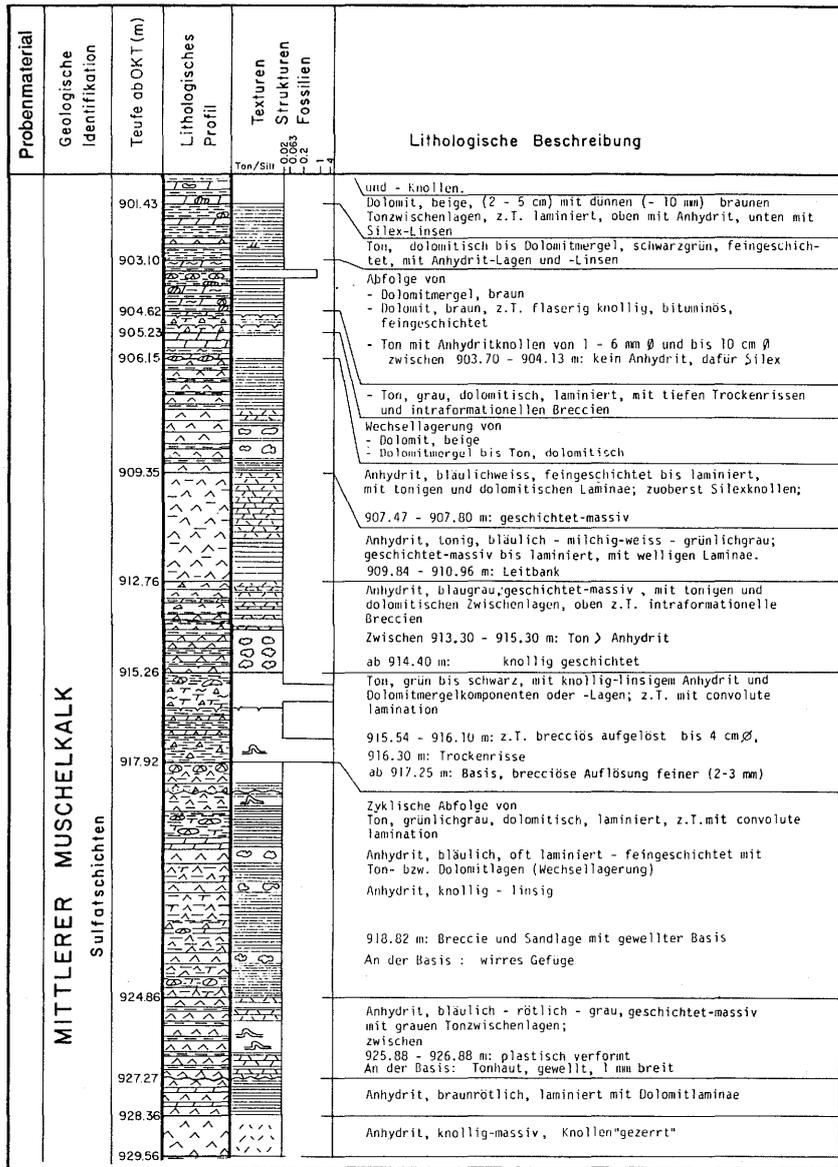
Das Probenmaterial stammt aus der NAGRA-Bohrung Weiach (Fig. 2) und aus Bohrungen, welche im Valkastielstollen des Walgauwerkes der Vorarlberger Illwerke, Schruns, Oesterreich, ausgeführt wurden (Fig. 3).

Bei den Proben aus Weiach handelt es sich um zwei Proben aus dem unteren Opalinuston und neun Proben aus dem mittleren Muschelkalk ("Anhydritgruppe", Beilage 1, Fototafel 1). Das Material der Anhydritgruppe besteht hauptsächlich aus einer feingeschichteten bis laminierten Wechsellagerung von Ton, Dolomit und Anhydrit. Die Proben wurden als Bohrkerne nach der Entnahme auf der Bohrstelle in Folien vakuumverpackt und bis zur Verwendung im Labor auch so aufbewahrt.

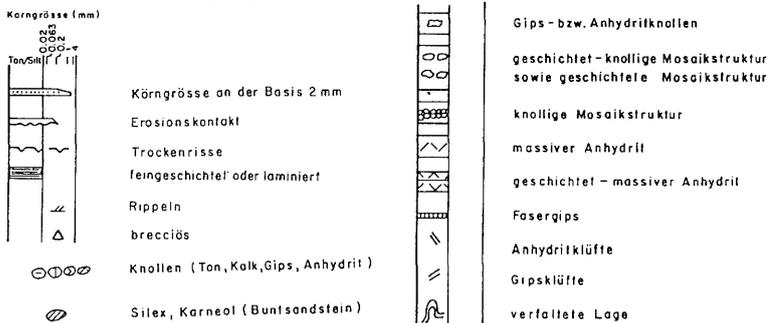
Aus dem Valkastielstollen wurden sieben Proben aus dem Raibler Gips (Oberostalpin) untersucht (Beilage 1, Fototafel 2). Das Material wurde mittels Trockenbohrungen vom Stollen aus gewonnen und unverpackt im Probenlager der Vorarlberger Illwerke in Schruns aufbewahrt. Die Proben bestehen hauptsächlich aus unterschiedlichen Mengen von zerrissenen Tonklasten in einer Anhydritmasse. Die Ueberlagerungshöhe am Entnahmeort beträgt bis ca. 1600m. Weitere Anhydrit- und Gipsvorkommen wurden z.T. entlang Störungszonen und in der Arosler Zone (Unterostalpin) beobachtet.

Da aus dem Opalinuston nur zwei Proben aus der Bohrung Weiach zur Verfügung standen, wurden in diesem Bericht auch Resultate aus früheren Untersuchungen mitberücksichtigt. Es handelt sich dabei um Material, welches im Rahmen des Bözbergtunnel-Projektes untersucht wurde. Die verwendeten mineralogischen Daten stammen aus einer Untersuchung an luftgetrockneten Proben (Madsen 1976). Die Quellparameter hingegen stammen aus einer späteren Untersuchung aus dem Jahre 1981 an im natürlichen Wassergehalt ungestörten Proben. Die Resultate dieser zweiten Untersuchung sind teilweise in Madsen und Nüesch (1989) veröffentlicht.

Die Proben sind im Probenverzeichnis im Anhang A1 - A3 aufgelistet.



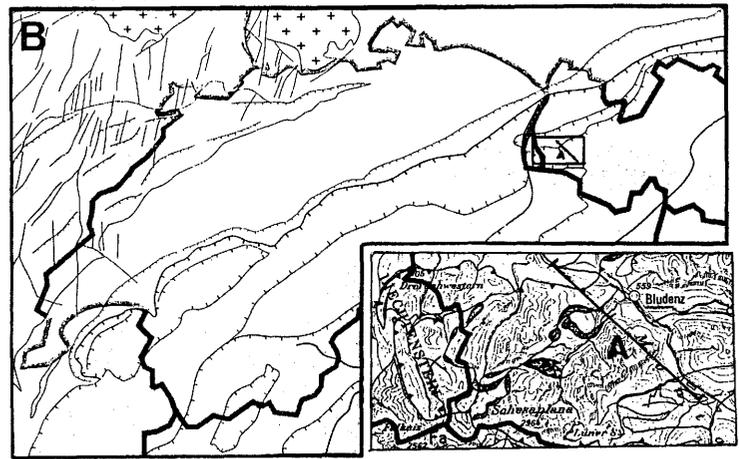
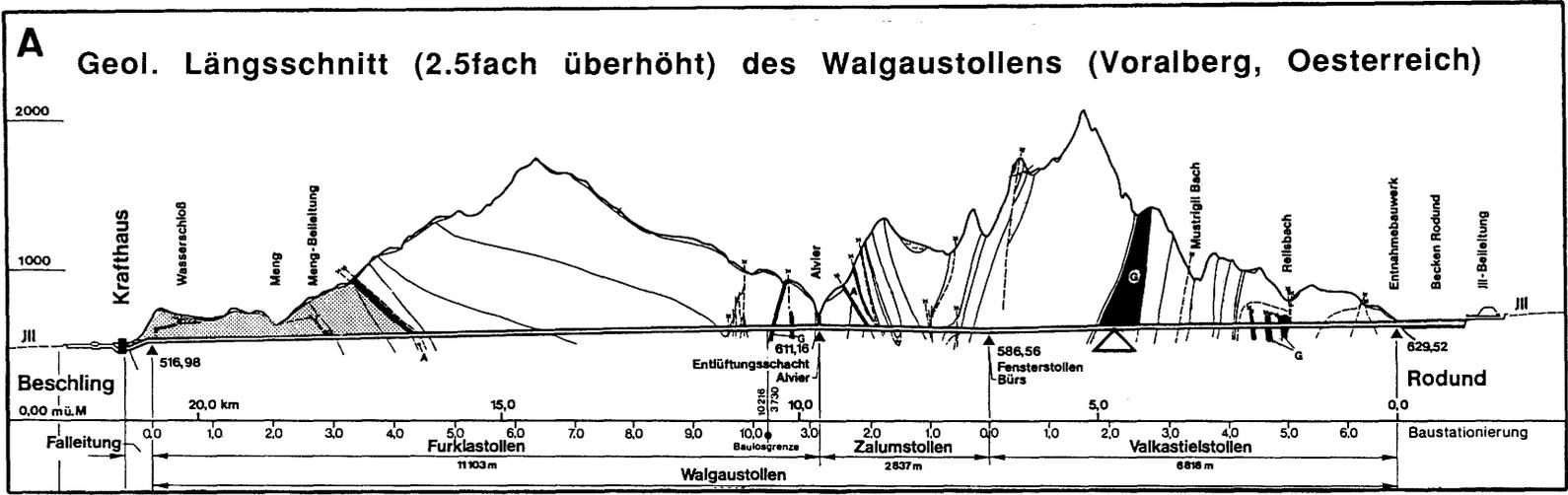
Texturen und Strukturen



aus NTB-86-01, Beilagen 6.2b und 6.2e

Fig. 2: Profil Weiach

Fig. 3: Profil Walgaustollen



Legende

- Anhydrit und Gipsvorkommen
- Störzone
- Herkunft des Probenmaterials (Raibler Gips)
- Penninikum (Voralberger Flysch)
- Unterostalpin (Arosar Zone)
- Oberostalpin (Lechtaldecke u. Basisschollen)

modifiziert nach Loacker (1985)

4. MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Das Ziel der mineralogischen Untersuchung war eine möglichst quantitative Beschreibung des Probenmaterials. Der Quellvorgang der Tongesteine - hier am Beispiel des Opalinustons dargestellt - in Abhängigkeit der mineralogischen Parameter ist aus früheren Untersuchungen bekannt. Dies trifft bei den tonhaltigen Sulfatgesteinen nicht zu. Die möglichst quantitative Charakterisierung der Proben dient deshalb zum besseren Verständnis des Quellmechanismus, insbesondere des Einflusses der Tonminerale auf die Anhydrit-Gips-Quellung.

4.1 Opalinuston

Aus der Bohrung Weiach standen nur zwei Proben zur Verfügung. Die Variabilität in der Zusammensetzung des Opalinustons ist aber aus früheren Untersuchungen (Madsen 1976, Madsen and Müller-Vonmoos 1985, sowie Madsen und Nüesch 1989) genügend bekannt, und so wurde auf die Untersuchung dieser zwei Proben verzichtet. Im folgenden werden die Methoden beschrieben, welche in den obgenannten Veröffentlichungen zur Charakterisierung des Opalinustons verwendet wurden. Untersucht wurde ausschliesslich Probenmaterial nach dem Quellversuch.

4.1.1 Kationen im Probenwasser

Nach Messung des Quelldrucks, d.h. nach mindestens zehntägiger Versuchsdauer, wurde das Wasser aus dem Probengefäss entnommen, der Gehalt an Na^+ und K^+ flammenphotometrisch und der Gehalt an Ca^{2+} und Mg^{2+} komplexometrisch bestimmt.

4.1.2 Karbonatgehalt

Der Karbonatgehalt wurde nach Piper (1944) bestimmt. Dazu wurde die Probe <0.2mm zerrieben und im evakuierten System mit Salzsäure aufgeschlossen. Das entwickelte CO_2 wurde in NaOH aufgefangen und nach Ausfällung mit BaCl_2 titrimetrisch bestimmt.

4.1.3 Anteil Tonfraktion (<2µm)

Das <2mm gebrochene Material wurde mittels Ultraschall in entsalztem Wasser dispergiert. Dabei wurde ein grosser Teil der Kalzitbrücken aufgebrochen (Müller-Vonmoos 1971). Das Karbonat wurde dann durch schwaches Kochen in einem Natriumacetat-Essigsäurepuffer von pH 5 gelöst und durch Zentrifugieren mit entsalztem Wasser ausgewaschen. Nach Trocknung bei 50°C wurde das entkarbonatete Material in einer 0.01-proz. Calgonlösung beschallt, der Anteil >63µm abgesiebt und der Anteil <2µm mit dem Pipetten-Apparat bestimmt.

4.1.4 Kationenaustauschkapazität (KAK)

Die KAK wurde an der Tonfraktion ermittelt. Dazu wurde die Tonfraktion in die NH_4^+ -Form gebracht, durch Zentrifugieren gewaschen und das NH_4^+ titrimetrisch nach Destillation gemäss MacKenzie (1951) bestimmt.

4.1.5 Spezifische Oberfläche

Es wird zwischen äusserer und innerer Oberfläche von Tonen unterschieden. Nicht-quellfähige Tone besitzen nur eine äussere Oberfläche, währenddem quellfähige Tonminerale sowohl eine äussere, als auch eine innere - für Wasser zugängliche - Oberfläche besitzen.

Die äussere Oberfläche wurde an <2mm gebrochener Probe nach der Stickstoffadsorptionsmethode von Brunauer, Emmett und Teller (BET) bestimmt. Dazu wurden die Proben 24 Stunden bei 10^{-6} Torr und 150°C getrocknet. Die Proben wurden in einer Ströhlein-Apparatur (Ein-Punkt-Messung) untersucht.

Die innere Oberfläche wurde nach Madsen (1977) mit der Glycerinmethode an der Tonfraktion bestimmt. Glycerin wird als polares Molekül zwischen den Elementarschichten quellfähiger Tonminerale eingelagert. Dabei wird der Basisabstand der Elementarschichten durch die Einlagerung von zwei Moleküllagen bei Zimmertemperatur auf 1.78nm aufgeweitet. Beim Erhitzen auf 150°C reduziert sich der Basisabstand unter Bildung eines Einschichtkomplexes auf 1.41nm. Bei weiterem Erhitzen auf 300°C verringert sich der

Basisabstand auf etwa 1.0nm, d.h. das restliche Glycerin wird abgegeben.

Die Versuche wurden gemäss Madsen (1976) und Madsen (1977) auf einer Mettler Thermowaage durchgeführt. Nach Glycerinadsorption und Wägung wurden die luftgetrockneten Proben mit 4°C/Min auf 150°C und nach Erreichen der Gewichtskonstanz auf 300°C aufgeheizt. Die Oberfläche wurde unter Annahme von einem spezifischen Gewicht des Glycerins bei 150°C von 1.165Mg/m³ und einer monomolekularen Schichtdicke von 0.45nm berechnet. Eine monomolekulare Schicht von 1g Glycerin bedeckt demnach eine Oberfläche von 1907m². Berücksichtigt wird die Menge Glycerin, welche zwischen 150°C und 300°C abgegeben wird. Bei der inneren Oberfläche ist das Verhältnis 2 x 1907m²/g Glycerin. Bei der Berechnung der Gesamtoberfläche (äussere plus innere Oberfläche) aus der Glycerinadsorption muss also der Wert der äusseren Oberfläche (aus der BET Messung bekannt) einmal abgezogen werden.

4.1.6 Mineralogische Zusammensetzung

Die qualitative mineralogische Zusammensetzung der Proben wurde mittels Röntgendiffraktometrie am Ausgangsmaterial (Pulver) und an der Tonfraktion (orientierte Schmierpräparate) bestimmt.

Vor Herstellung der orientierten Präparate aus der Tonfraktion wurde die organische Substanz durch Oxidation mit H₂O₂ und die amorphen Eisenoxyde durch Extraktion mit Dithionit-Zitrat nach Mehra and Jackson (1960) entfernt. Die Proben wurden in die Ca-Form umgewandelt und wie folgt aufgenommen:

nach Lufttrocknung bei 40% rel. Feuchtigkeit

nach Trocknung im Vakuum

nach Trocknung bei 250°C

nach Trocknung bei 600°C

nach Behandlung mit Hydrazin

nach Behandlung mit Glycerin

Die Trocknung im Vakuum und bei 250°C, sowie die Behandlung mit Glycerin dient dem Nachweis quellfähiger Tonminerale. Die Trocknung bei 600°C und die Hydrazinbehandlung dient dem besseren Nachweis von Kaolinit und Chlorit. Hydrazin lagert sich zwischen den Elementarschichten des Kaolinitkristalls ein und verursacht eine Verschiebung des 001-Reflexes von etwa 0.7nm auf etwa 1nm. Dadurch wird auch der 002-Reflex von Chlorit bei etwa 0.7nm sichtbar.

4.2 Tonige Sulfatgesteine

Das Ziel der Untersuchung der tonigen Sulfatgesteine war es, das sehr unterschiedliche Quellverhalten der Gesteinsproben erklären zu können. Insbesondere sollte der Einfluss des Tonanteils auf die Umwandlung von Anhydrit in Gips abgeklärt werden.

Die Schwierigkeit in der Untersuchung lag in der quantitativen Erfassung der Mineralparameter mit einer genügenden Genauigkeit. Währenddem beispielsweise der Gehalt an Karbonaten relativ einfach und genau bestimmt werden kann, ist dies bei den Sulfaten nicht der Fall. Auch ist es einfach, das Karbonat aus einer Probe zu eliminieren, z.B. durch Erwärmen in einem Natriumacetat/Essigsäurepuffer bei pH 5. Die Sulfate dagegen müssen komplexometrisch entfernt werden, was viel aufwendiger ist. Besondere Schwierigkeiten traten dort auf, wo der Tongehalt der Proben unter 5% liegt. Um genügend Tonmaterial für die röntgendiffraktometrische Identifikation der Minerale zu erhalten, mussten grosse Probemengen entkarbonatet und entsulfatet werden.

Es wurde sowohl ungestörtes (ungequollenes) als auch gequollenes Material untersucht. Das ungestörte Material wurde unmittelbar neben der für Quellversuche vorgesehenen Probe aus den Bohrkernen trocken abgesägt. Beim ungestörten Material wurde das Schwergewicht auf die Bestimmung des Gehaltes an Gips in den Proben gelegt.

4.2.1 Gipsgehalt

Gips wurde qualitativ mittels Röntgendiffraktometrie nachgewiesen. Für den quantitativen Nachweis wurden die Proben zwei Tage über Phosphorpentoxyd (P_2O_5) in einem geschlossenen Gefäß gelagert. Das P_2O_5 absorbiert das am

Ton adsorbierte Wasser, ohne das Gips-Kristallwasser zu beeinflussen. Das Gipswasser wurde dann auf der Thermowaage durch Aufheizen der Probe entfernt und gravimetrisch/-massenspektrometrisch bestimmt.

4.2.2 Karbonatgehalt

Der Gehalt an Karbonat (hauptsächlich Dolomit) wurde mit der Passonmethode bestimmt. Die <0.25mm gemahlene Probe wird mit warmer Salzsäure zersetzt und das freigesetzte Kohlendioxid volumetrisch gemessen.

4.2.3 Anteil Tonfraktion (<2 μ m) und Tongehalt

Der Gehalt an Tonfraktion wurde mit der Pipette nach Andreasen und mit dem Kopecky-Gerät bestimmt. Im Kopecky-Gerät wird das Material <63 μ m mittels unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten in die Fraktionen 63-20, 20-10, 10-5, 5-2 und <2 μ m aufgeteilt.

Die Dispergierung des Materials erfolgte mit Ultraschall. Um eine Flockung zu verhindern, mussten einige Proben kurz mit Soda gekocht werden. Ausserdem wurde allen Proben Calgon als Dispersionsmittel zugefügt. Bei den gequollenen Proben wurde bei Materialien mit viel Ton der Sulfatanteil vor der Pipettenanalyse quantitativ mit Komplexon entfernt.

Bei einigen Proben, besonders denjenigen mit sehr kleinem Anteil <2 μ m, wurde der Tongehalt mittels Thermowaage/-Massenspektrometer aus der OH-Entwässerung der Tonminerale berechnet.

Ebenfalls wurde der Tongehalt aus den Pulveraufnahmen mit dem Röntgendiffraktometer geschätzt.

Als Qualitätsnachweis für die Bestimmung der Tonfraktion gilt die Korrelation zwischen Menge Ton und der spezifischen (äusseren) Oberfläche einer Probe. Aus früheren Untersuchungen (Madsen 1976) ist bekannt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Grössen besteht.

4.2.4 Spezifische Oberfläche

Die äussere spezifische Oberfläche wurde an <2mm gebrochener Probe nach der Stickstoffadsorptionsmethode von Brunauer, Emmett und Teller (BET) bestimmt. Dazu wurden die Proben 2 Stunden bei 10^{-6} Torr entwässert. Ein gleichzeitiges Ausheizen des Materials, wie es bei reinen Tonsteinen ausgeführt wird, führt bei Material mit Gips zu unrealistisch hohen Oberflächen, weil der Gips beim Aufheizen auf 150°C alles Wasser abgibt und in sehr feine Teilchen zerfällt.

4.2.5 Mineralogische Zusammensetzung

Die qualitative mineralogische Zusammensetzung der Proben wurde mittels Röntgendiffraktometrie am Ausgangsmaterial (Pulver) und an der Tonfraktion (orientierte Schmierpräparate) bestimmt. Die Tonfraktion wurde in der Ca-Form im luftgetrockneten Zustand (40% rel. Luftfeuchtigkeit) und nach Glycerineinlagerung aufgenommen.

An ausgewählten Proben wurde die Tonfraktion mittels Infrarotspektroskopie untersucht. Es ging hier vor allem um die Bestimmung von kleinen Mengen Kaolinit und Quarz.

5 ERGEBNISSE DER MINERALOGISCHEN UNTERSUCHUNGEN

5.1 Opalinuston

Für die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchung konnten Resultate aus früheren Untersuchungen (Madsen 1976 und Madsen and Müller-Vorhmoos 1985) berücksichtigt werden. Es handelt sich dabei um die Untersuchung von 19 Proben, welche im Rahmen des Bözberg Tunnel-Projekts ausgeführt wurde.

Die an den gleichen Proben gemessenen Quelldrücke haben sich allerdings gemäss späteren Untersuchungen (Madsen und Nüesch 1989) als zu hoch erwiesen, weil das Probenmaterial vor dem Quellversuch luftgetrocknet wurde. Dies hat allerdings keinen Einfluss auf die mineralogischen Kennwerte.

5.1.1 Kationen im Probenwasser

Nach Messung des Quelldrucks wurde das Wasser aus dem Probengefäss der Apparatur entnommen und die Kationenkonzentrationen bestimmt. Das Verhältnis der einwertigen zu den zweiwertigen Ionen betrug 80/20, wobei die Na⁺-Ionen mit 75% am stärksten vertreten waren.

Es wurde angenommen, dass Gleichgewicht herrscht zwischen den Kationenkonzentrationen im Probengefäss und im Porenwasser der Probe. Es wurde deshalb gefolgert, dass auch im Porenwasser der Proben die einwertigen Kationen vorherrschen. Es kann weiterhin angenommen werden, dass die Kationen in der Doppelschicht des Opalinustons vorwiegend Na-Ionen sind und der Opalinuston also in der "Na-Form" vorliegt.

5.1.2 Karbonatgehalt

Der Karbonatgehalt gemäss Madsen (1976) und Madsen und Nüesch (1989) liegt zwischen 7 und 18Gew.%. Der Durchschnitt mit Standardabweichung beträgt 11% resp. 3%. Die Karbonate liegen als Calcit und Dolomit vor.

5.1.3 Anteil Tonfraktion (<2 μ m)

Der Gehalt an Tonfraktion variiert zwischen 37 und 59Gew.% mit einem Durchschnitt von 49% und einer Standardabweichung von 6%.

5.1.4 Kationenaustauschkapazität (KAK)

Die KAK der Tonfraktion beträgt im Durchschnitt 31mäq/100g mit einer Standardabweichung von 3mäq/100g. Dies bedeutet, dass die KAK des Gesteins - je nach Tongehalt - zwischen 11 und 18mäq/100g liegt mit einem Durchschnitt von 15mäq/100g.

5.1.5 Spezifische Oberfläche

Die am Gesamtmaterial <2mm gemessenen äusseren (BET) Oberflächen liegen zwischen 22 und 37m²/g. Durchschnitt und Standardabweichung betragen 30m²/g resp. 4m²/g.

Zwischen dem Anteil Tonfraktion, welcher hauptsächlich aus Tonmineralen besteht, und der BET-Oberfläche besteht ein linearer Zusammenhang, wie aus Fig. 4 ersichtlich. Dies bedeutet, dass die mineralogische Zusammensetzung der Tonfraktion bei allen Proben etwa identisch ist.

Die Bestimmung der Gesamtoberfläche - also innere plus äussere Oberfläche - der Tonfraktion mit Glycerin auf der Thermowaage ergab dann auch immer etwa die gleichen Werte. Die Gesamtoberfläche der Tonfraktion beträgt im Durchschnitt 135m²/g mit einer Standardabweichung von 5m²/g.

Mit Hilfe der Angaben über den Anteil Tonfraktion der Proben und der spezifischen Gesamtoberfläche der Tonfraktion kann die spezifische Oberfläche des Gesteins berechnet werden. Diese liegt zwischen 50m²/g für einen Anteil <2 μ m von 37% und 80m²/g für einen Anteil <2 μ m von 59%. Der Durchschnitt beträgt 66m²/g für einen Anteil Tonfraktion von 49%.

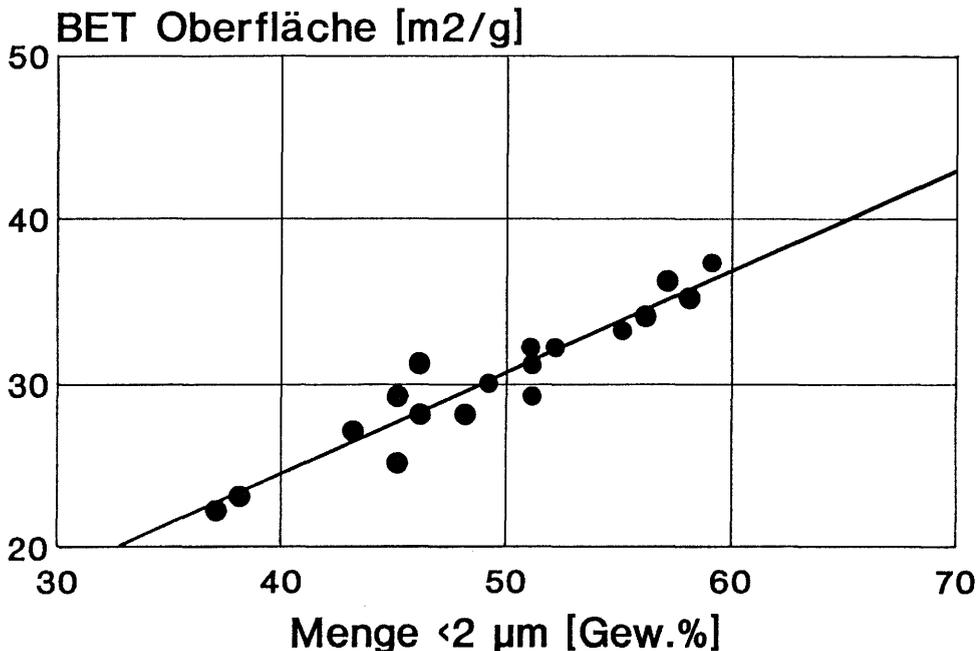


Fig. 4: Äussere Oberfläche von Opalinustonproben (Bözbergtunnel) nach BET in Abhängigkeit des Anteils <2μm.

5.1.6 Mineralogische Zusammensetzung

Der Opalinuston setzt sich zusammen aus Tonmineralen, Quarz, Karbonaten, wenig Feldspat, Pyrit und organischen Substanzen. Der Gehalt an Quarz, Karbonaten, Feldspat, Pyrit und organischen Verbindungen machen im Durchschnitt etwa die Hälfte des Gesteins aus. Der Rest ist Ton. Der Anteil an Feldspat, Pyrit und organischen Verbindungen beträgt höchstens 10% vom Gesamtmaterial. Der Gehalt an Karbonaten beträgt etwa 11%. Demnach liegt der Quarzgehalt in der Grössenordnung von 25%.

Die Tonfraktion setzt sich aus Tonmineralen und Quarz zusammen. Der Quarzgehalt liegt in der Grössenordnung von höchstens 5%.

Gemäss den Röntgenaufnahmen, Fig. 5, sind die Tonminerale Kaolinit, Illit, Mixed layer Illit/Smektit und Chlorit vorhanden.

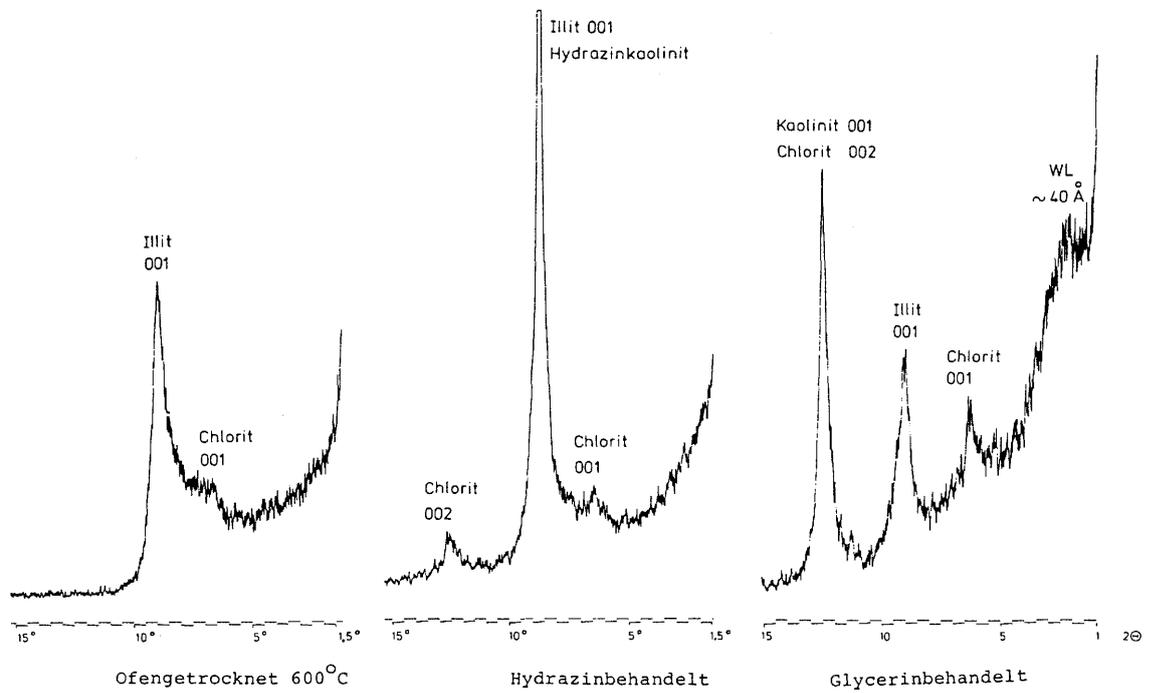
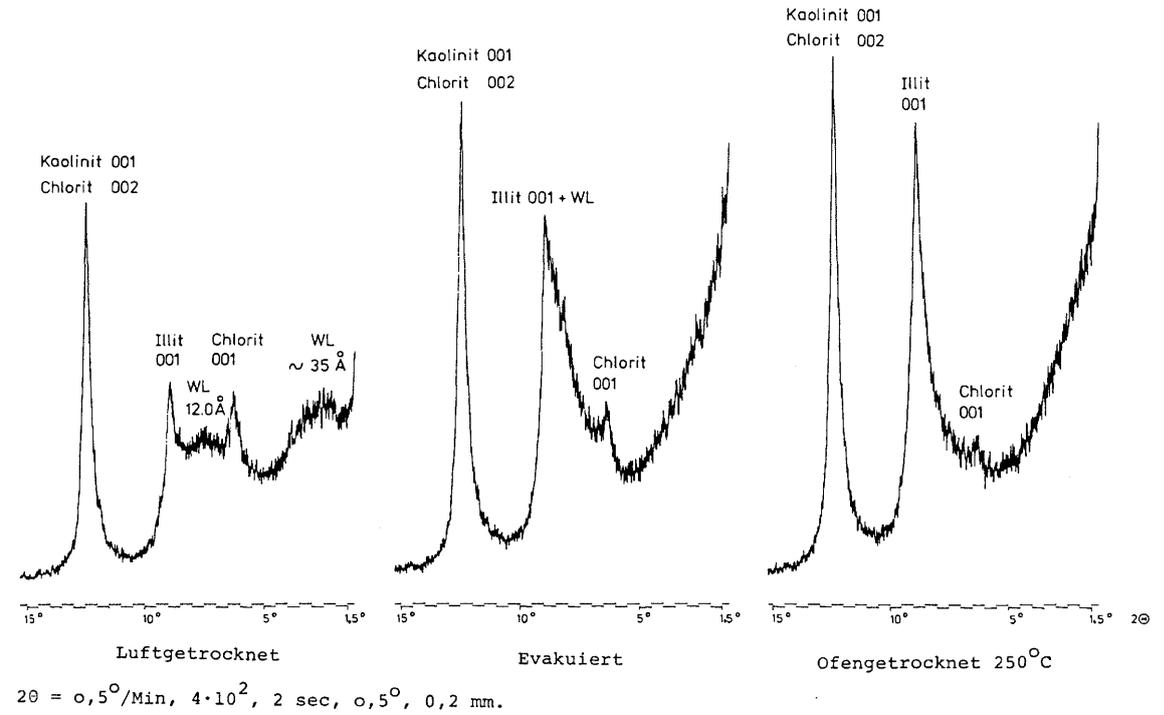


Fig. 5: Röntgendiffraktogramme von der Tonfraktion des Opalinustons nach verschiedene Behandlungen.

Der Anteil offener, quellfähiger Smektitschichten im Mixed layer Illit/Smektit wurde aus den Peaks bei 1.2 und 3.5nm (luftgetrocknetes Präparat), resp. 4.0nm beim glycerin-behandelten Präparat nach Brindley and Brown (1984) auf etwa 30% geschätzt.

Wurde das luftgetrocknete Präparat evakuiert, gaben die quellfähigen Smektitschichten der Wechsellagerung das Wasser grösstenteils ab. Der Peak bei 3.5nm verschwand, und der 001-Peak des Illits wurde dementsprechend stärker. Das restliche Zwischenschichtwasser wurde bei 250°C abgegeben.

Beim Erhitzen auf 600°C gab der Kaolinit sein Hydroxylwasser ab, und der 002-Peak des Chlorits wurde zugunsten des 001-Peaks abgeschwächt, so dass bei 0.715nm kein Peak mehr zu beobachten war. Eindeutig liess sich der Chlorit nach Hydrazinbehandlung nachweisen. Dabei verschob sich der 001-Peak des Kaolinit durch Einlagerung von Glycerin auf 1.04nm, und der 002-Peak des Chlorits wurde sichtbar, (Weiss et al. 1963).

Tabelle 1: Karbonatgehalt, Anteil Tonfraktion und äussere spezifische Oberfläche des Opalinustons.

Bohrung Nr.	Tiefe m	Karbonat Gew. %	Tonfraktion Gew. %	BET Oberfläche m ² /g
3	127	17	43	27
3	128	18	38	23
3	130	10	46	28
3	135	11	51	32
3	136	7	55	33
3	138	8	48	28
3	141	9	51	31
3	155	16	37	22
20	13	13	45	29
20	24	12	52	32
20	26	12	51	29
20	30	12	46	31
20	33	12	45	29
20	34	11	45	25
20	39	7	49	30
20	85	9	56	34
5256.20	81	10	57	36
5256.20	89	11	59	37
5256.20	106	9	58	35

Aus den Diffraktogrammen wurde unter Berücksichtigung der entsprechenden Absorptionsfaktoren folgende Zusammensetzung der Tonfraktion geschätzt:

Kaolinit	25%
Illit	25%
Illit/Smektit 70/30	35%
Chlorit	10%
Quarz und anderes	5%

5.2 Tonige Sulfatgesteine

Für das Quellverhalten ist die mineralogische Zusammensetzung von Bedeutung, denn sowohl Quelldruck als auch Quellhebung werden durch den Tonanteil beeinflusst. Werden z.B. die ausgebauten Proben miteinander verglichen (Beilage 2, Fototafel 3, Bild a-f), so ist von der Probe mit dem maximalen Quelldruck von 4.4MPa (Bild a) zu derjenigen mit dem geringsten Quelldruck von 0.04MPa ein abnehmender Tonanteil von 8Gew.% auf <1Gew.% festzustellen. Eine Ausnahme in dieser Reihe bildet die Probe mit 9% Ton und einem Quelldruck von 1.9MPa (Bild d).

Die Bestimmung der Mineralzusammensetzung erfolgte an Probenmaterial in unmittelbarer Nachbarschaft der für den Quelldruck ausgewählten Probenscheiben von ca. 3cm Dicke (Tabelle 2) und nach dem Quellversuch an der ausgebauten Probe (Tabelle 3). Es kann somit nicht genau dasselbe Probenmaterial vor und nach dem Quellversuch verglichen werden, was sich bei sehr heterogenem Probenmaterial mit unterschiedlichen Mineralanteilen auswirkte (siehe Beilage 1, Fototafeln 1 und 2). Daher wurden beim Ausgangsmaterial neben Anhydrit und Gips auch die sich durch Quellen nicht verändernden Mineralanteile wie Ton, Karbonat, Quarz und Feldspat bestimmt.

5.2.1 Mineralogie des vergleichbaren Ausgangsprobenmaterials für die Quellversuche

In Tabelle 2 ist nur die Mineralzusammensetzung der Proben von Weiach zusammengestellt, welche im Gegensatz zu denjenigen vom Walgauwerk viel heterogener sind (vgl. auch Beilage 1, Fototafeln 1 und 2). Die Bestimmung beruht auf geschätzten Werten von XRD-Aufnahmen und den mineralogischen Untersuchungsmethoden (Kap. 4.2), deren Ergebnisse im Anhang (Tabellen A, 8-12) zu finden sind und im folgenden diskutiert werden.

Tabelle 2: Mineralzusammensetzung des vergleichbaren Probenmaterials für Quellversuche; Analysen siehe Anhang (Werte für Anhydrit, Quarz und Feldspat wurden aus XRD-Aufnahmen geschätzt).

Tiefe m	Lab.Nummer	Anhydrit Gew.%	Gips Gew%	Ton Gew.%	Karbonat Gew.%	Quarz Gew.%	Feldspat Gew.%	Foto- tafel 1
902.01	40865	45	3	17	25	5-10	<1	-
909.03	40868a	75	2	20	1	<5	<1	a
909.03	40868/1a	60	3	30	3	<5	<1	a
910.78	40868/2a	80	<1	4	1	10-15	<1	a
910.78	40869a	98	Ø	<2	Ø	<1	<1	b
912.67	40870a	75	<1	6	15	<5	Ø	c
912.67	40870/1a	85	<1	4	9	<5	<1	c
913.80	40871a	70	2	11	7	5-10	<1	d
915.41	40873a	75	<1	20	Ø	<5	<1	e
916.61	40874a	10	4	55	8	15-20	5	f
918.41	40876a	85	<1	3	7	<5	<1	h
919.77	40900a	50	2	24	19	<5	<1	g

alle Werte sind in Gew.% der ofentrockenen Proben angegeben.

Es gelten folgende Abkürzungen: Ø = nicht nachgewiesen, - = nicht gemessen

Anhydrit

Die meisten Proben weisen hohe Anhydritgehalte (>70%) auf, was auch aus den Peakintensitäten der XRD-Aufnahmen (Tab. A-8) hervorgeht. An drei ausgewählten Proben wurde komplexometrisch der Sulfatgehalt bestimmt (Tab. A-11). Diese Werte wurden als Maximalwerte (Lösen von Karbonat kann nicht ausgeschlossen werden) in die geschätzten Anhydritgehalte einbezogen.

In Dünnschliffen ist Anhydrit der Proben von Weiach als feinkörniges (<0.1mm) und oft filziges Aggregat ausgebildet (z.B. Beilage 2, Fototafel 3). Anhydrit der Proben aus dem Walgau hingegen sind grobkörnig, oft grösser als 0.5mm und weisen z.T. idiomorphe Gestalt auf, die auf Rekristallisierung hinweist (Beilage 2, Fototafel 4, Bild d).

Gips

Gips konnte nur in einer Probe mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) qualitativ nachgewiesen werden. Die quantitative thermogravimetrisch/massenspektrometrische Bestimmung (TG/MS) ergab Gipsgehalte von 0 - 4.3Gew.% bei einem Durchschnittsgehalt von 1.6Gew.% (Tab. A-11). Diese Gipsgehalte liegen somit unter der Nachweisgrenze von XRD (ca. 5%). Diese sehr geringen Gipsgehalte könnten auf eine Vergipsung des fein gemahlene Probenmaterials durch Luftfeuchtigkeit infolge der Probenaufbereitung zurückgeführt werden, zumal in der Kernbeschreibung aus dieser Tiefe kein Gips aufgeführt wurde (Bläsi und Matter, 1988).

Ton

Die Tonfraktion (<2 μ m) wurde sowohl nach Kopecky als auch nach der Pipettenmethode nach Andreasen bestimmt. Die Werte der nach Kopecky bestimmten Proben sind bis auf eine (Weiach 915.41m) kleiner als diejenigen, welche mit der Pipette bestimmt wurden (Tab. A-11). Es wird angenommen, dass sich bei der Methode nach Kopecky der feinste Sulfat-Anteil in der grösseren Wassermenge (50 Liter) besser gelöst hat als in der Pipette (0.5 Liter). Der Tonanteil wurde aus der Entwässerung durch Aufheizen in der Thermowaage gravimetrisch und massenspektrometrisch bestimmt (Tab. A-11). Für die Gesamtmineralzusammensetzung (Tabelle 2) wurden die zu hohen Werte der Proben Weiach 915.41m und 916.61m nicht berücksichtigt.

Aus den XRD-Aufnahmen der Fraktion <2 μ m geht die Mineralzusammensetzung hervor (Tab. A-10), welche aus Tonmineralien (Corrensit, Smektit, Chlorit/Kaolinit, Illit) in unterschiedlichen Anteilen und den wesentlichen Akzessorien Quarz und Feldspat besteht. Alle gemessenen Proben enthielten Chlorit und Illit, während Smektit in einer Probe (Weiach 902.01m) und Corrensit in den meisten Proben nachgewiesen wurde. Die Mineralanteile wurden aus den

Peakintensitäten geschätzt. Mit Infrarot wurde an vier ausgewählten Proben <5% Kaolinit- und <3% Quarz <2µm bestimmt (Tab. A-12). Da in zwei Proben weder Kaolinit noch Quarz bestimmt wurde, können sowohl für Quarz als auch für Kaolinit vernachlässigbare prozentuale Anteile angenommen werden.

Karbonat

Der Karbonatgehalt, bestimmt mit der Passonmethode (Tab. A-9), liegt zwischen 0 und 25% mit einem Durchschnittswert von 8%. Das Karbonat liegt aufgrund von XRD-Aufnahmen hauptsächlich als Dolomit vor, (>90%) nebst wenig Calcit und teilweise Magnesit. Es gibt auch Hinweise auf das Eisenkarbonat Siderit. Das Karbonat ist Bestandteil der mergeligen Lagen resp. der Klasten und als feinkörniges Aggregat im Dünnschliff nicht bestimmbar.

Quarz und Feldspat

Der Quarzanteil und die Werte für die Feldspäte wurden aus XRD-Aufnahmen unter Berücksichtigung der Intensitätsfaktoren geschätzt. Quarz und Feldspat sind Bestandteile der Mergellagen und der Klasten.

5.2.2 Mineralogie der ausgebauten Proben

Die ausgebauten Proben wurden senkrecht halbiert, die eine Hälfte für Dünnschliffe und die andere zur Bestimmung der Mineralogie verwendet. Die Mineralzusammensetzung ist in Tabelle 3 zusammengestellt und beruht auf Werten verschiedener Untersuchungsmethoden (Anhang A10 bis A13, Tab. A-13 bis A-18).

Im folgenden wird kurz die Bestimmung der Mineralanteile aufgeführt. Die Sulfatminerale Gips und Anhydrit, welche anteilmässig als einzige durch das Quellen eine wesentliche Aenderung erfahren haben, werden im nächsten Kapitel (5.2.3) ausführlicher besprochen.

Tabelle 3: Mineralzusammensetzung der ausgebauten Proben; Analysen siehe Anhang (Werte für Anhydrit berechnet, Werte für Quarz und Feldspat geschätzt)

Tiefe m	Lab.Nummer	Anhydrit Gew.%	Gips Gew.%	Ton Gew.%	Karbonat Gew.%	Quarz Gew.%	Feldspat Gew.%
Weiach							
902.01	40865bQd	25	9	23	30	10	<5
909.03	40868bQd	78	5	5	1	10-15	<1
909.03	40868bQm	28	60	3	<1	5-10	<1
910.78	40869bQd	99	Ø	<1	Ø	<1	Ø
910.78	40869bQm	99	Ø	<1	Ø	<1	Ø
912.67	40870bQd	62	7	9	12	5-10	<1
913.80	40871bQd	62	11	8	8	5-10	<1
913.80	40871bQm	11	71	5	2	10-15	<1
915.41	40873bQd	73	9	5	Ø	10-15	<1
916.61	40874bQd	18	4	43	23	10-15	<1
918.41	40876bQd	84	2	3	10	<5	<1
918.41	40876bQm	54	34	4	5	<5	<1
919.77	40900bQd	39	12	29	19	<1	<1
Walgau							
1983	40860bQd	70	9	2	6	10-15	<1
1823	40440/1bQd	79	13	2	1	<5	<1
1823	40440/3bQd	16	80	1	1	<5	<1
1953	40816bQd	81	5	3	2	5-10	<1
2155	40819bQd	87	7	1	<1	<5	Ø
1953	40856bQd	72	5	6	6	10-15	<1
unbekannt	41125bQd	62	4	1	29	5	<1

alle Werte sind in Gew.% der ofentrockenen Proben angegeben.

Es gelten folgende Abkürzungen: Ø = nicht nachgewiesen, - = nicht gemessen

Anhydrit wurde aus der komplexometrisch bestimmten Sulfatmenge und dem Gipsanteil berechnet (Tab. A-17). Der **Gips- und Tonanteil** wurde gravimetrisch/massenspektrometrisch bestimmt (Tab. A-16). Der Tonanteil der mineralogisch nicht bestimmten Proben kann aus der Bestimmung der Fraktion <2µm ermittelt werden (Tab. A-15). Die Fraktion <2µm wurde von ausgewählten Proben doppelbestimmt, sowohl mit der Pipette nach Andreasen, als auch durch Abhebern. Der Tonanteil geht aus dem Rest nach der Komplexonbehandlung (Sulfat wurde weg gelöst) unter Berücksichtigung von Karbonat, Quarz und Feldspat hervor. Das **Gesamtkarbonat**, bestimmt mit der Passonmethode, ist aus Tabelle A-14 ersichtlich. Die Quarz- und Feldspatanteile wurden aus den Peakintensitäten der XRD-Aufnahmen unter Berücksichtigung der Intensitätsfaktoren geschätzt (Tab.A-13).

5.2.3 Gips und Anhydrit

An den ausgebauten Proben wurde folgende Vergipsung beobachtet: Die Proben aus den Quelldruckversuchen sind von einer 2-3mm dicken Gipshaut umgeben (z.B. Beilage 2, Fototafel 3, Abb. e). Aus dem Dünnschliffbild dieser Probe (Abb. g) ist mit Hilfe gekreuzter Nicols und Gipsplättchen der Aufbau des Gipssaumes aus einzelnen Gipskristallen mit unterschiedlicher Orientierung ersichtlich. Die äussere Vergipsung reicht, sichtbar anhand der gleichen Farbe, als Matrix in den feinkörnigen Anhydrit hinein.

Bei Mergel- und Dolomitlagen ist der Gipssaum dicker (Abb. h). Die äussere Vergipsung wurde an dieser Stelle begünstigt. Proben aus Quellmass-Versuchen (Fototafel 5, Abb. c) weisen bei vergleichbarem Probenmaterial (Fototafel 3, Abb. f) eine dickere Gipshaut auf (bis 6mm). Im Unterschied zum Gipssaum der Proben aus Quelldruckversuchen wurden bei freier Quellung feinkörniger Gips am Rand der Probe und grosse idiomorphe Kristalle gegen innen beobachtet (Fototafel 5, Abb. d).

Zu der die Probe umschliessenden Gipshaut (äussere Vergipsung) wurde auch eine Vergipsung in der Probe beobachtet. Diese innere Vergipsung ist makroskopisch ersichtlich an den aufgeschnittenen Proben der Quellhebungsversuche (Fototafel 5) und mikroskopisch anhand der Dünnschliffe von Proben aus den Quelldruckversuchen (Fototafel 4). Die innere Vergipsung der Proben aus Quelldruckversuchen beschränkt sich hauptsächlich auf gipsgefüllte Klüfte und ansatzweise auf aufgelösten Anhydrit längs Bruch- und Spaltflächen (Fototafel 4, Abb. b).

Die aus dem massigen Anhydrit der Probe Walgau 40440/1 (Fototafel 4, Abb. c) vor dem Versuch gemahlene und gesinterte Probe Walgau 40440/3b (Fototafel 4, Abb. d) weist nach einer Versuchsdauer von 2099 Tagen nur noch Anhydritrelikte in einer dunkelgrauen Gipsmatrix auf. Die Vergipsung der Anhydritrelikte wirkt auch hier bevorzugt an Spaltflächen.

Ton- und Mergelklasten sind randlich oft vergipst. In dem Grenzbereich zwischen Ton und Anhydrit sind auch die meisten Anhydritkristalle vergleichsweise besser aufgelöst und weisen grössere Gipssäume auf (Fototafel 5, Abb. e). Die bestimmten Gipsanteile (Kap. 5.2) beruhen im wesentlichen auf solche gipsgefüllte Klüfte. In feinsten Mikrokluftungen wurde über Lösung Gips auskristallisiert, was im Dünnschliff als diffuse Vergipsung zweier Kluftrichtungen ersichtlich ist (Fototafel 4, Abb. f).

Grössere Klüfte sind z.T. mit gut erkennbarem Fasergips ausgefüllt (Fototafel 4, Abb. h). Diese Fasern, welche die Oeffnungsrichtung dokumentieren, werden durch Rekristallisation wieder konsumiert (Hinweis auf ein dynamisches Gleichgewicht), und es entsteht am Ende dieses Kristallisationsprozesses ein homogen ausgebildeter Gips (Fototafel 4, Abb. g).

Das unbehinderte Gipswachstum in den Quellmass-Versuchen bewirkt die Ausbildung von grossen Gipskristallen bis zu 1cm Grösse (Fototafel 5, Abb. a und b). Die Gipskristalle wachsen zwischen den Mergellagen und bilden eine poröse Struktur, welche eine Quellhebung von beispielsweise 82% bewirkt (Fototafel 5, Abb. f).

Anhydritklasten in der Mergelmatrix (Fototafel 5, Abb. e) weisen eine randliche Vergipsung auf, welche mit der äusseren Vergipsung zu vergleichen ist (z.B. Fototafel 5, Abb. c).

In den Gipskristallen sind an dem höheren Brechungsindex und an der hohen Interferenzfarbe Anhydritrelikte zu erkennen (Fototafel 5, Abb. g). Der Gips wächst bevorzugt an tonigen Lagen, die später z.T. überwachsen werden und als Relikt im Gipskristall erhalten bleiben (Fototafel 5, Abb. h). Aus der oberen Tonlage (Pfeil) sind beispielsweise mehrere Gipskristalle gewachsen.

5.2.4 Spezifische Oberfläche

Die spezifische äussere Oberfläche wurde an der <2mm gebrochenen Probe mittels Stickstoffadsorption nach Brunauer Emmet und Teller (BET) bestimmt. Die Proben wurden 24 Stunden bei 10^{-6} Torr und 150°C getrocknet und anschliessend in einer Ströhlein-Apparatur (Ein-Punkt-Messung) gemessen (A 14, Tab. A-19).

Werden nun die BET-Oberflächen gegen den Anteil der Tonfraktion (<2 μm) aufgetragen, so ergibt sich eine Gerade (Fig. 6).

Die lineare Abhängigkeit der BET-Oberfläche vom Anteil <2 μm deutet auf eine sehr ähnliche tonmineralogische Zusammensetzung aller Proben hin. Dieses Resultat stimmt mit der diffraktometrisch bestimmten Zusammenhang der Fraktion <2 μm überein.

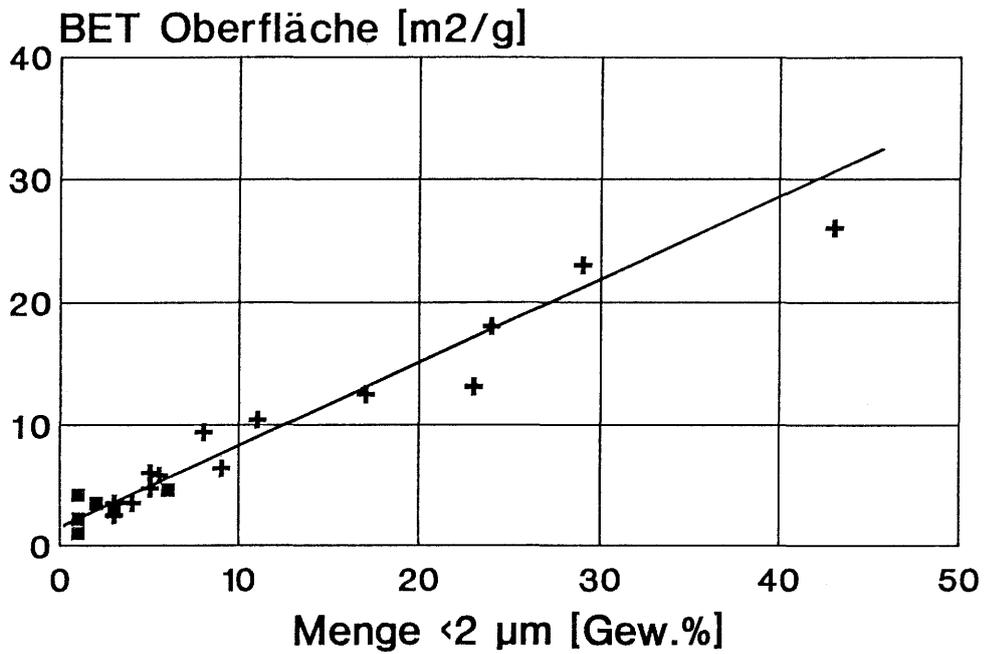


Fig. 6: Äussere Oberfläche von Proben der Bohrung Weiach (Kreuze) und Proben aus dem Valkastielstollen (Quadrate).

6 VERSUCHSANORDNUNG UND METHODIK DER QUELLVERSUCHE

6.1 Tongesteine

Die unten beschriebenen Versuchstechniken beruhen auf der Reversibilität der Tonquellung. Diese Eigenschaft ermöglicht die Bestimmung des maximalen Quelldrucks, indem am Gerät durch kleine Nachstellungen die ursprüngliche Probenhöhe konstant gehalten wird. Auch beim lastabhängigen Quellversuch wird im reversiblen Bereich der Probenkörper komprimiert und entlastet.

6.1.1 Quelldruck

Im Gebirge wie auch im Labor kann der Quellvorgang durch einen Gegendruck verhindert werden. Bei Messungen im Labor wird der maximale Druck σ^* , welcher aufgewendet werden muss, um jede Volumenvergrößerung zu verhindern, als Quelldruck bezeichnet (Fig. 1b).

Der Quelldruck wird an Scheiben von Bohrkernen gemessen. Die scheibenförmige Probe von etwa 3cm Dicke wird in einen Stahlring so eingebaut, dass jede radiale Quellung verhindert wird. Die axiale Quellung wird durch die Messvorrichtung und die Steifheit des Messapparates stark behindert, lässt sich aber nicht völlig vermeiden. Um das Probenvolumen konstant zu halten, wird die Volumenzunahme der Probe durch die Rückstellvorrichtung (Fig. 7) in kleinen Stufen immer wieder so korrigiert, dass die ursprüngliche Probenhöhe erhalten bleibt. Wenn keine weiteren Korrekturen notwendig sind und der maximale Quelldruck erreicht ist (Fig. 8), wird der Versuch beendet.

Die Bestimmung des Quelldruckes einer Probe dauert etwa 14 Tage. Dabei sind etwa 70% der Quellung normalerweise nach ein bis zwei Tagen erreicht.

6.1.2 Quellmass

Einen Eindruck vom Quellpotential eines Gesteins vermittelt auch das sogenannte Quellmass. Das Quellmass wird meistens in axialer Richtung an allseitig frei quellenden Bohrkern

scheiben von ca. 3cm Höhe gemessen und in Prozent der ursprünglichen Probenhöhe angegeben. Ein Quellversuch dieser Art ist, wie die Messeinrichtung in Fig. 9 zeigt, relativ einfach auszuführen. Als zusätzliche Information wird auch die radiale Vergrößerung der Probe gemessen und als radiales Quellmass angegeben.

Der Quellmassversuch an tonhaltigen Gesteinen, wie Opalinuston, dauert im allgemeinen nicht länger als zwei bis vier Wochen (Fig. 10). Der Hauptteil der Quellung ist nach wenigen Tagen abgeschlossen.

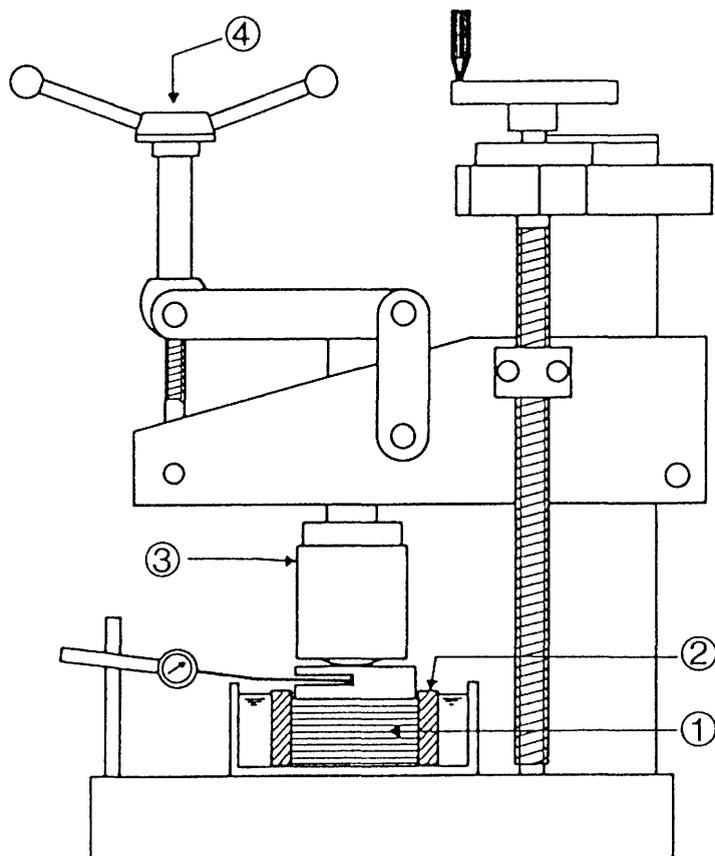
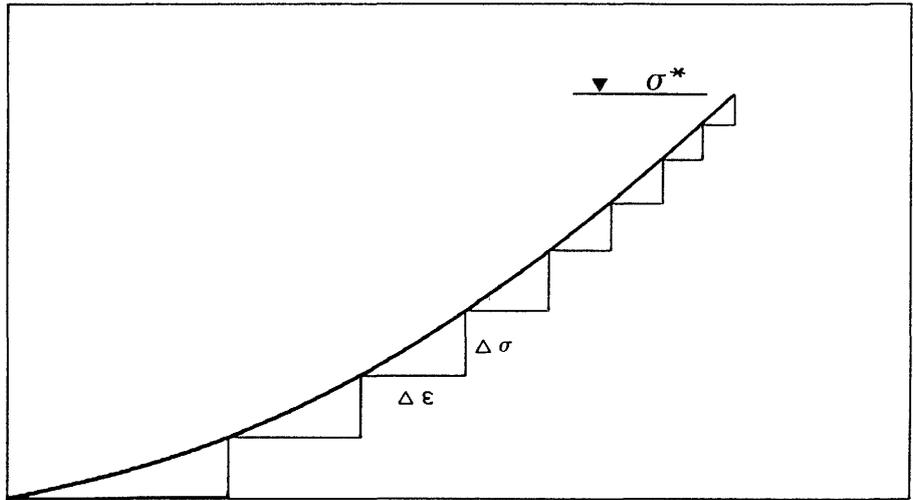


Fig. 7: Apparat zur Messung des Quelldruckes.

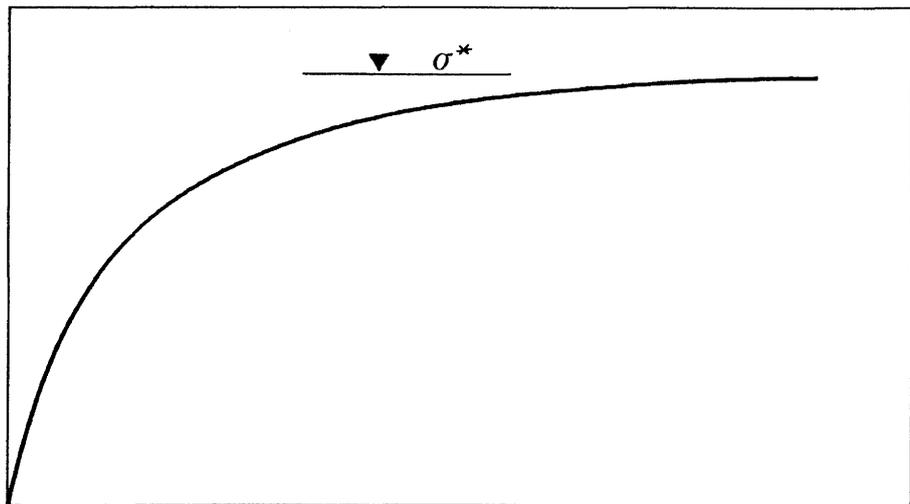
- 1: Probe.
- 2: Stahlring.
- 3: Druckdose.
- 4: Rückstellvorrichtung

Quelldruck



Summe zurückgestellte Quellhebung

Quelldruck



Zeit

Fig. 8: Quelldruck in Abhängigkeit der aufsummierten Hebung (oben).
 Quelldruck in Abhängigkeit der Zeit (unten).

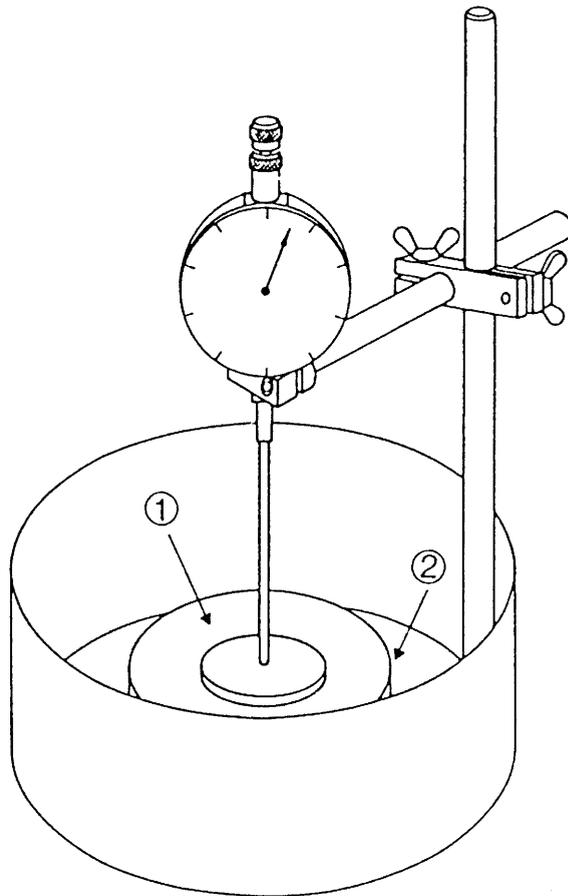


Fig. 9: Apparat zur Messung des axialen und radialen Quellmasses bei unbehinderter Quellung.

- 1: Probe.
- 2: Stahlband

6.1.3 Quelldruck - Quellmass

Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass zwischen Quelldruck und Quellmass ein Zusammenhang besteht. So ergeben Proben, welche hohe Quellmasse aufweisen, auch hohe Quelldrücke.

Sowohl Quelldruck als auch Quellmass sind, neben der Abhängigkeit von mineralogischen und chemischen Grössen, vom Überlagerungsdruck im Gebirge abhängig. Gesteine mit kleinem Überlagerungsdruck ergeben kleine Quelldrücke und Quellmasse im Vergleich zu Gesteinen gleicher mineralo-

gischer Zusammensetzung und grossem Überlagerungsdruck. Dabei wirken sich Unterschiede im Überlagerungsdruck bei gleichem Tonanteil stärker auf den Quelldruck aus als auf das Quellmass.

Im Labor wird der Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quellmass in lastabhängigen Quellversuchen untersucht.

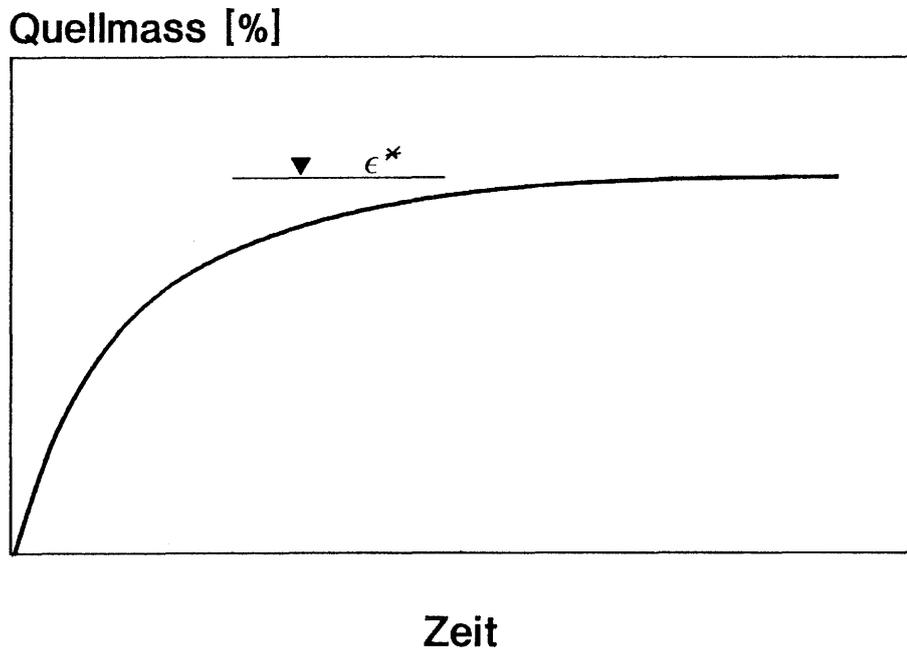


Fig. 10: Quellmass in Abhängigkeit der Zeit.
 ϵ^* = maximales Quellmass

6.1.4 Lastabhängige Quellung

Quelldruck und Quellmass sind - bei einwandfreiem Probenmaterial - als im Labor gemessene Maximalwerte zu betrachten. Sie geben zwar einen Hinweis auf die Problematik des Gesteins, dürfen aber wohl nur im Extremfall als Bemessungskennwerte für die Stützmassnahmen im Tunnel verwendet werden. Vielmehr macht man sich hierbei die Tatsache zunutze, dass der Quelldruck mit zunehmendem Abstand zwischen den wasserzugänglichen Tonteilchen-Oberflächen kleiner wird, und lässt dementsprechend eine Deformation zu.

Das Prinzip einer experimentell bestimmten Abhängigkeit des Quelldruckes von einer zugelassenen Deformation ist aus Fig. 11 ersichtlich. Sie wurde aus lastabhängigen Quellversuchen, in Anlehnung an Huder und Amberg (1970), bestimmt. Dabei wird die Bohrkernscheibe im Oedometer zuerst stufenweise axial belastet, und zwar aus apparativen Gründen normalerweise nur bis 2MPa. Auf der höchsten Laststufe wird Wasser zugegeben, und der Quellvorgang wird aufgezeichnet. Wenn keine weitere Quellung mehr stattfindet, wird auf die nächstkleinere Laststufe entlastet, und so weiter. Ein Quellversuch dieser Art dauert in der Regel etwa vier Monate.

Setzung bzw. Hebung

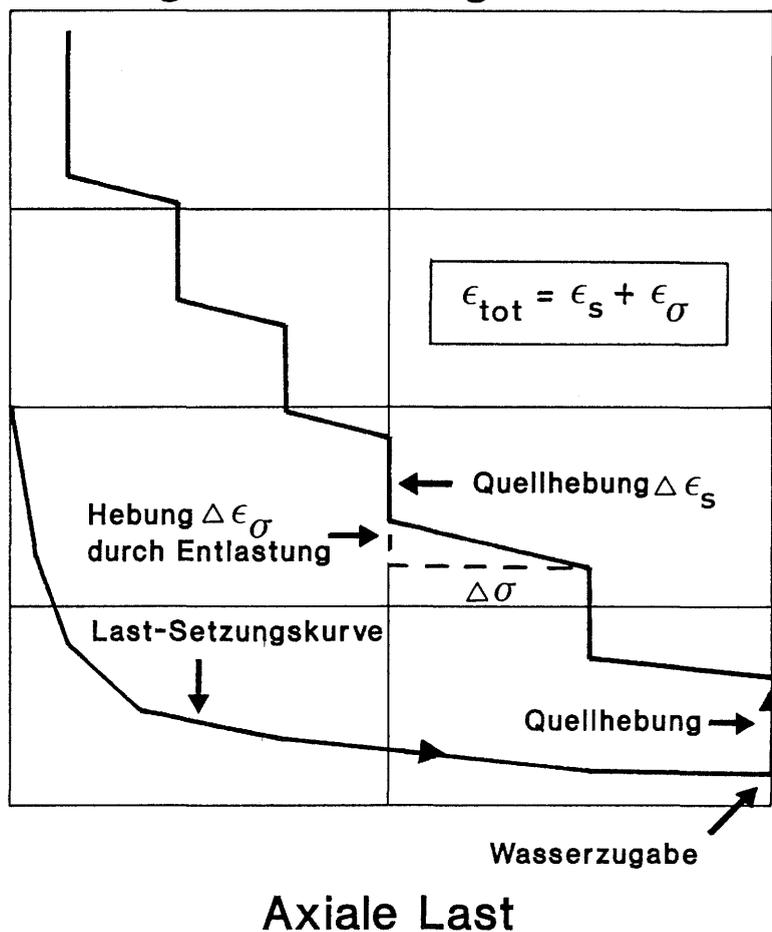


Fig. 11: Setzung und Hebung einer Probe in Abhängigkeit der Last.

Die axiale Deformation ϵ_{tot} , welche nach der Wasserzugabe gemessen wird, setzt sich aus einem elastischen Anteil ϵ_{σ} und einem aus der Quellhebung stammenden Anteil ϵ_s zusammen. Der elastische Anteil ϵ_{σ} der Hebung stellt sich gleichzeitig mit der Entlastung ein, dagegen findet die Quellhebung ϵ_s allmählich statt. Sie ist beendet, wenn der Quelldruck mit der Last im Gleichgewicht ist.

6.2 Tonige Anhydritgesteine

Die Umwandlung von Anhydrit in Gips ist nur unter bestimmten Bedingungen, z.B. in reinem Wasser bei $T > 58^{\circ}\text{C}$ bei 1atm (Hardie 1967) oder bei einer Temperatur von 20°C durch einen zusätzlichen Druck von 80MPa, reversibel. Für die oberflächennahen Jura-Gebirgsverhältnisse wird die Vergipsung als irreversibel betrachtet. Diese Tatsache wird bei der Versuchsausführung berücksichtigt. Bei der Bestimmung des Quelldruckes ist es daher nicht sinnvoll, die Probe auf ihre ursprüngliche Probenhöhe zu komprimieren.

Die Versuchsdauer bei der Bestimmung des Quelldruckes im Labor liegt in der Größenordnung von mehreren Jahren. Deshalb ist auch die Durchführung von lastabhängigen Quellversuchen, wie sie bei reinen Tongesteinen erfolgen, nicht praktikabel. Ein solcher Versuch mit fünf Laststufen, bei welchem die volle Quellhebung bei jeder Laststufe abgewartet würde, nähme etwa 15 Jahre in Anspruch.

6.2.2 Quelldruck

Für die Bestimmung des Quelldruckes wird der gleiche Apparat verwendet wie bei den Tongesteinen. Es werden auch hier zylindrische Proben von etwa 3cm Dicke in einen Stahlring so eingebaut, dass jede radiale Quellung verhindert wird. Um bei allen Proben die gleichen Versuchsbedingungen zu haben, wird statt destilliertem Wasser CaSO_4 -Wasser (2.4g CaSO_4 pro Liter Wasser) dazugegeben.

Die axiale Quellung wird durch die Steifheit des Gerätes stark behindert. Die ursprüngliche Probenhöhe wird nicht konstant gehalten, da Zurückstellungen nur in den ersten Tagen (Tonquellung) vorgenommen werden. Es wird vielmehr eine Deformation von bis zu etwa 2,8% der ursprünglichen Probenhöhe in Kauf genommen.

Drei Versuche an Proben aus dem Walgauwerk wurden bei einer Temperatur von 7°C ausgeführt, um die Gebirgsverhältnisse zu simulieren (Anhang: A28, A30, A33). Alle übrigen Versuche wurden bei 20°C durchgeführt (Anhang: A15 ff). Ein Versuch wurde mit gemahlenem und verdichtetem Anhydrit durchgeführt (Anhang: A29).

6.2.3 Quellmass

Die Ermittlung des Quellmasses in axialer Richtung der Bohrkerns erfolgt an scheibenförmigen Proben von etwa 3cm Dicke. Wie bei Quelldruckversuchen, sind auch diese Proben unter CaSO_4 -Wasser (2.4g/L). Der Quellvorgang verläuft im Vergleich mit demjenigen der Tongesteine sehr langsam und dauert mehrere Jahre.

7 ERGEBNISSE DER QUELLVERSUCHE

7.1 Opalinuston

7.1.1 Quelldruck

Die Quelldrücke sind sehr unterschiedlich. Sie variieren zwischen 0.1MPa und 1.7MPa. Die Quelldrücke der Proben nehmen mit zunehmender Entnahmetiefe bis etwa 80m unter OK-Terrain zu und sind nachher etwa konstant (Fig. 12). Die Schichtneigung im Opalinuston der Bohrung 5256.20 Bözberg nimmt bezüglich der Bohrkernachse mit der Tiefe von 70°-80° oben bis 30°-40° im unteren Bereich ab. Erfahrungsgemäss ist der Quelldruck senkrecht zur Schichtung grösser als parallel zur Schichtung. Da die Quelldrücke hier in Richtung der Bohrachse gemessen wurden, können die gegen unten zunehmenden Drücke mit der gegen unten kleiner werdenden Schichtneigung teilweise erklärt werden. Dieser Effekt wird noch verstärkt durch die mit der Tiefe zunehmenden Lagerungsdichte des Gesteins.

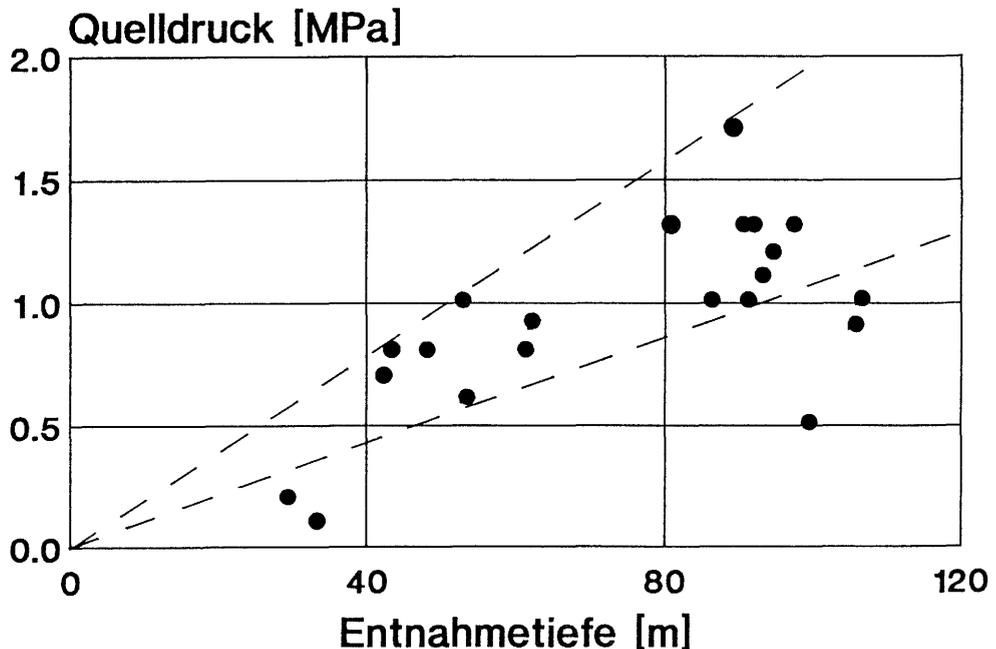


Fig. 12: Quelldruck von Opalinustonproben (Bözberg) in Abhängigkeit der Entnahmetiefe.

Um den Vergleich mit den früher gemessenen Werten (Madsen 1976) herzustellen, wurden drei Proben von 3cm Dicke während zwei Tagen im Labor bei 20°C und 40% relativer Luftfeuchtigkeit getrocknet. Die Quelldrücke dieser Proben liegen mit bis 3.6MPa in der Grössenordnung früher gemessener Werte. Damit wäre der Nachweis erbracht, dass die sehr hohen Quelldrücke (>3MPa in Madsen 1976) durch Austrocknen des Probenmaterials zustande gekommen sind.

Der niedrige Quelldruck von 0.3 resp 0.5MPa bei den Proben Weiach 646,55 - 646,80m (40852) resp. Bözberg, Bohrung 5256.20, 99m (39425), ist auf schlechte Probenqualität zurückzuführen.

In Fig. 13 ist eine typische Quelldruck-Zeit-Funktion des Opalinustons aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass der grösste Teil der Quellung in den ersten 24 Stunden abläuft.

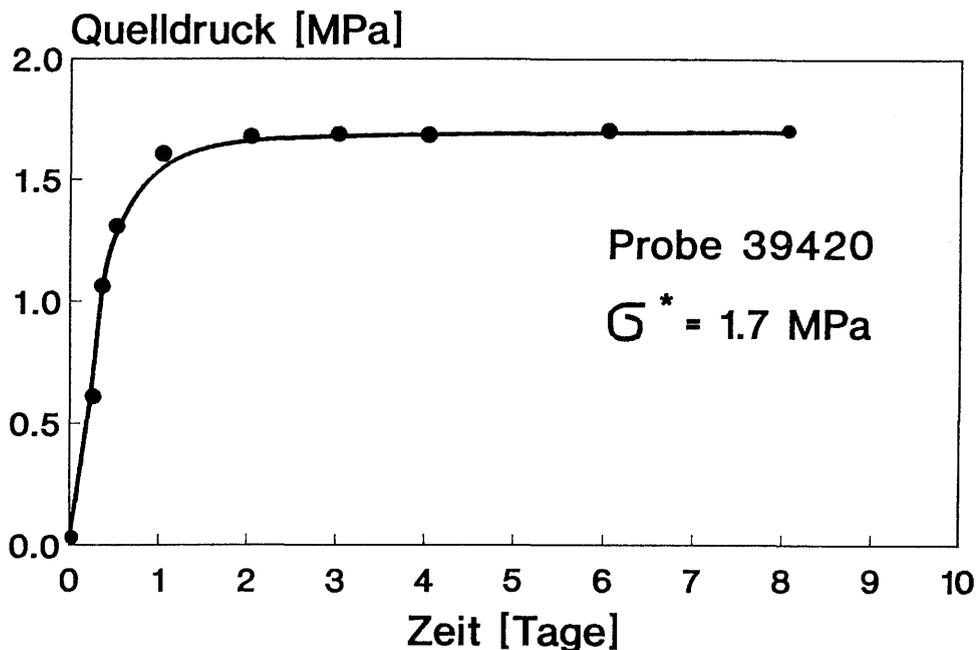


Fig. 13: Axialer Quelldruck in Abhängigkeit der Zeit.

Opalinustonprobe Nr. 39420. Bözberg.
Bohrung 5256.20. Tiefe 89m.

7.1.2 Quellmass

Die Werte der freien axialen Quellhebung variieren zwischen 0.9 und 5.8% der ursprünglichen Probenhöhe. Die meisten Werte liegen im Bereich von 4%. Die Werte der radialen Quellung liegen in der Grössenordnung von 1% bis 2%.

In Fig.14 ist eine typische Quellmass-Zeit-Funktion aufgetragen.

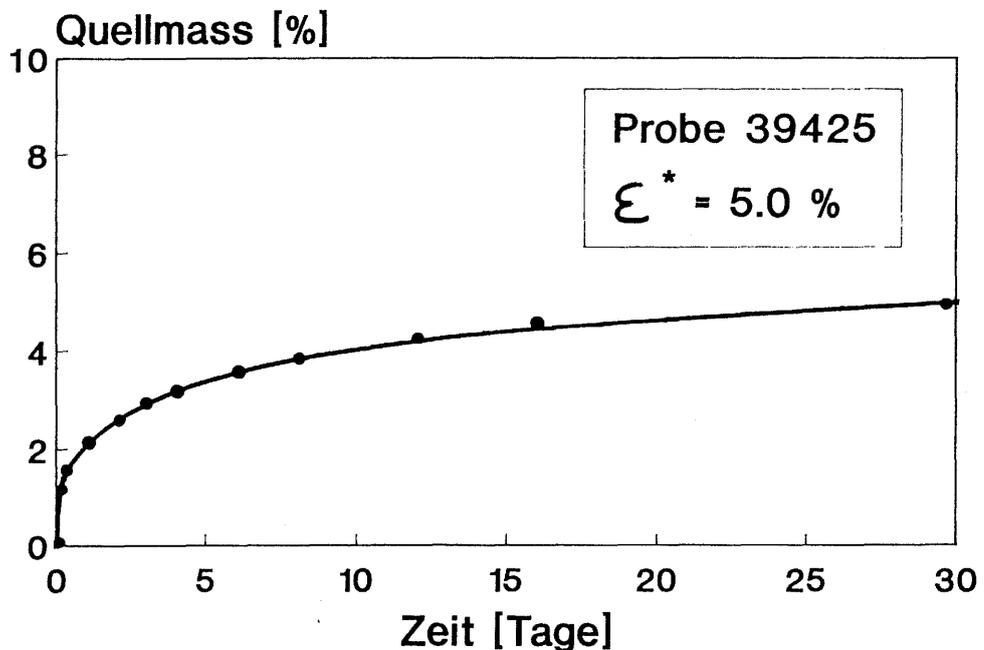


Fig. 14: Axiales Quellmass in Abhängigkeit der Zeit.

Opalinustonprobe Nr. 39425. Bözberg.
Bohrung 5256.20. Tiefe 99m.

7.1.3 Lastabhängige Quellung

Der lastabhängige Quellversuch der Opalinustonprobe Bözberg, Bohrung 5256.20, 106m Tiefe (Labor Nr.39427), ist in Fig. 15 aufgetragen. In Fig. 16 wurden die aus der Hebung stammenden, von der Quellung rührenden Anteile ϵ_{σ} aus Fig. 15 als "Quelldruck in Funktion einer zugelassenen

Hebung" zusammengefasst. Aus dieser Darstellung ist deutlich ersichtlich, dass eine kleine zugelassene Deformation eine drastische Reduktion des Quelldruckes mit sich bringt.

In Fig. 17 ist die Quellhebung der Probe Bözberg, Bohrung 5256.20, 99m Tiefe (Labor Nr. 39425), in Funktion der Zeit bei verschiedenen Laststufen aufgetragen. Eine totale Versuchsdauer von etwa vier Monaten ist notwendig, damit die Probe bei jeder Laststufe ausquellen kann.

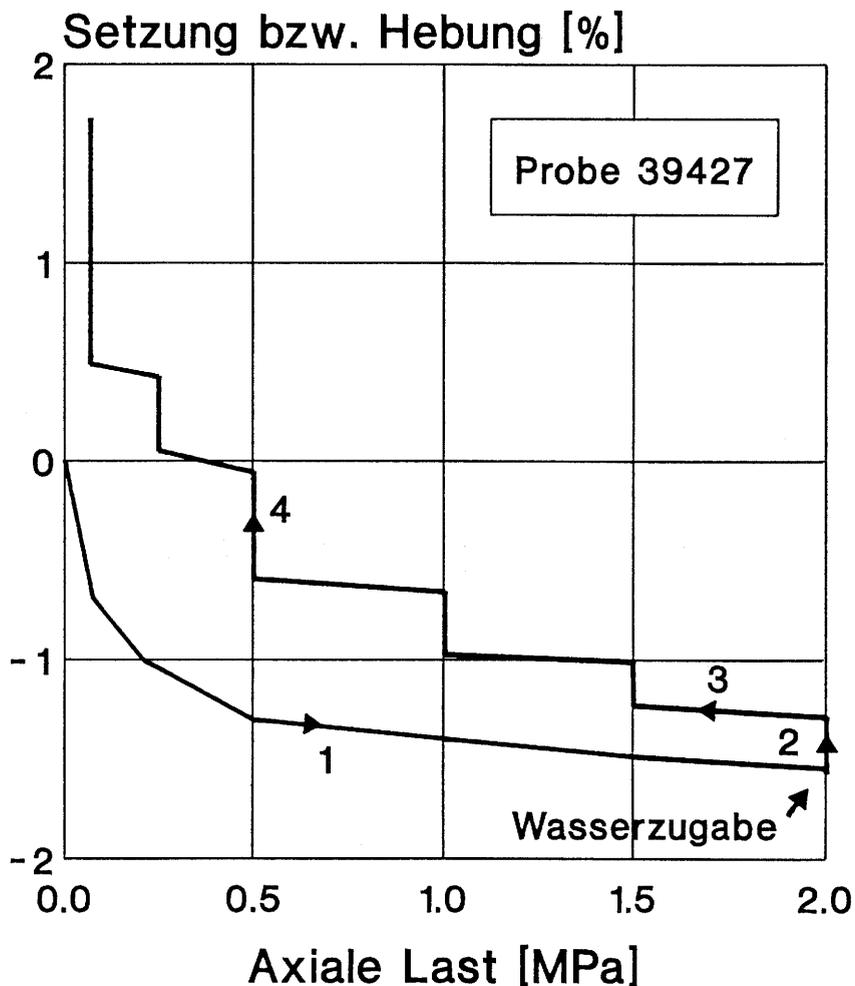


Fig. 15: Setzung bzw. Hebung in Abhängigkeit der Last.
 Opalinustonprobe 39427. Bözberg.
 Bohrung 5256.20. Tiefe 106m.
 1) Last-Setzungskurve
 2,4) Quellhebung nach Wasserzugabe
 3) Entlastungskurve

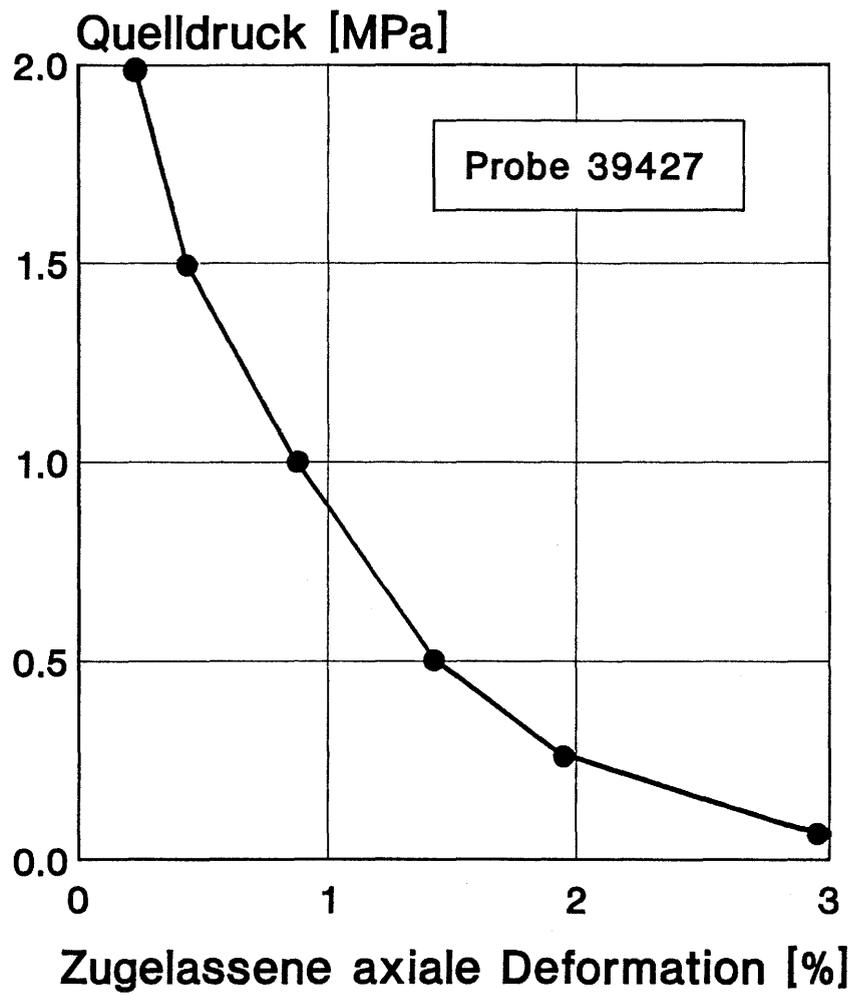


Fig. 16: Quelldruck in Funktion einer zugelassenen Hebung (axiale Deformation).

Opalinustonprobe 39427. Bözberg.
Bohrung 5256.20. Tiefe 106m.

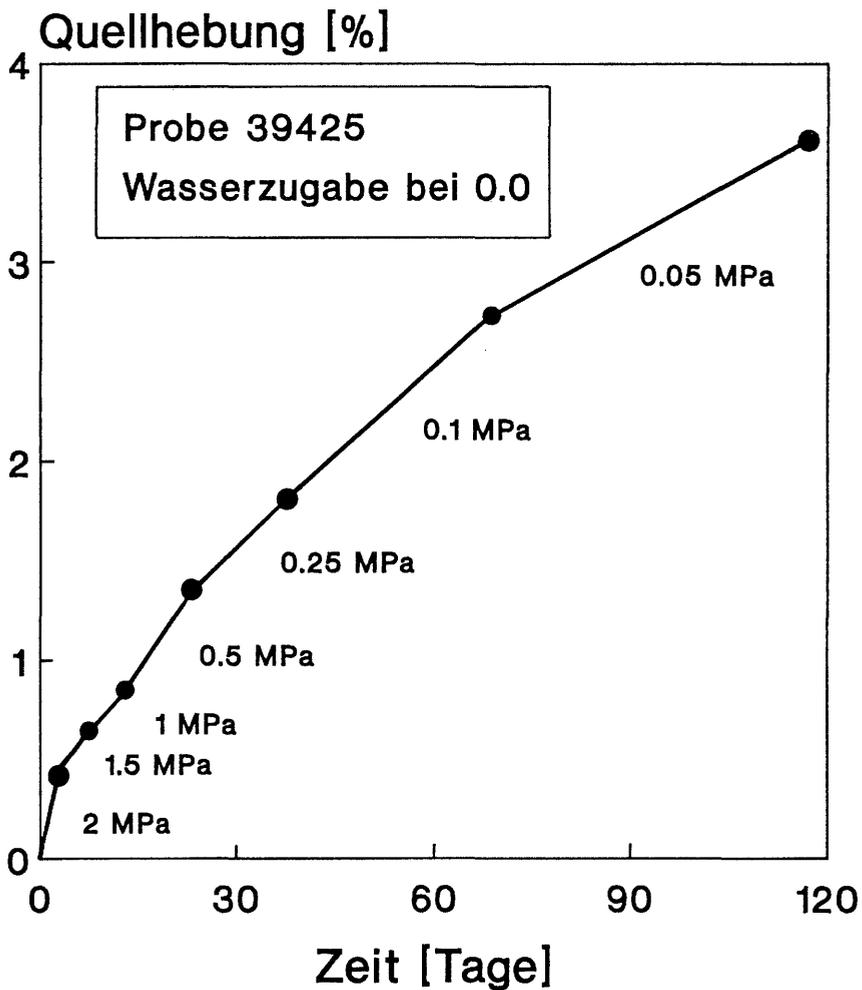


Fig. 17: Quelldruck in Abhängigkeit der Zeit bei verschiedenen Laststufen.

Opalinustonprobe 39425. Bözberg.
Bohrung 5256.20. Tiefe 99m.

7.2 Tonige Sulfatgesteine

7.2.1 Quelldruck

In Fig. 18 sind Beispiele von Quelldruckversuchen an tonigen Sulfatgesteinen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung aufgetragen. Die extrem langsame Entwicklung des Quelldruckes ist deutlich ersichtlich. Die grössten gemessenen Quelldrücke liegen im Bereich von 4.5MPa. Die Quelldruckversuche sind zudem einzeln im Anhang dargestellt.

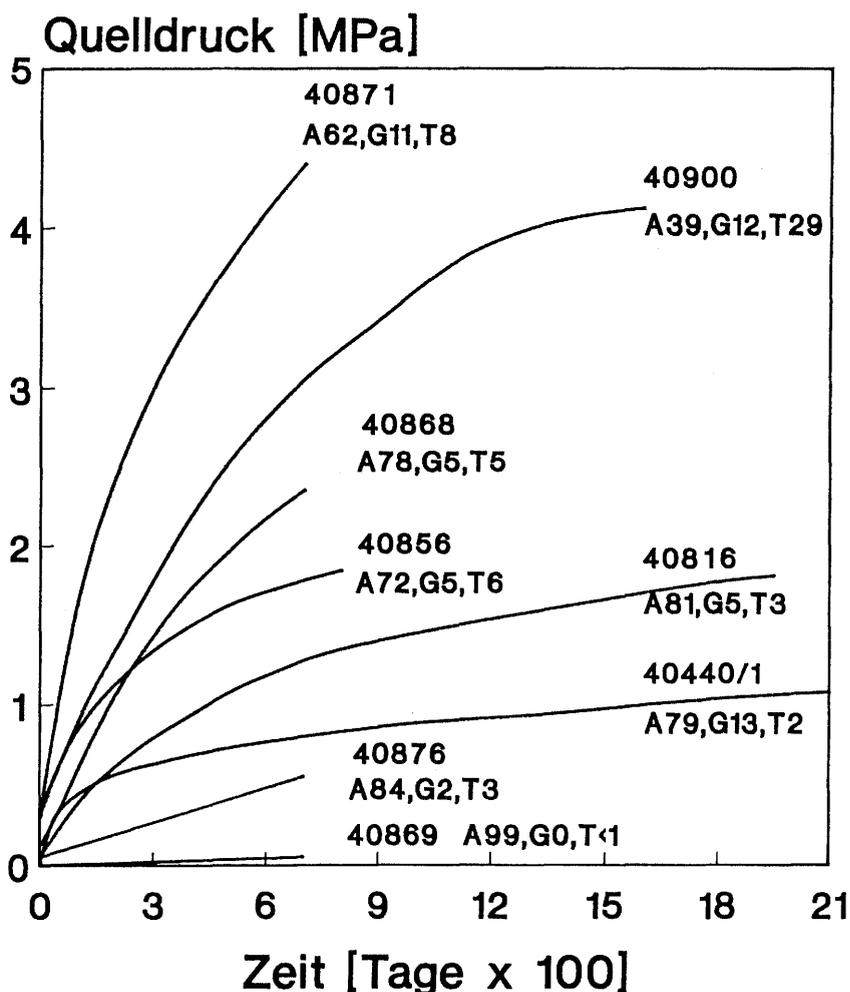


Fig. 18: Quelldruck von tonhaltigen Anhydritproben unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung in Abhängigkeit der Zeit.

A=Anhydrit, G=Gips, T=Ton in Prozent.

7.2.2 Quellmass

Die axiale Quellung erreicht Werte von über 120% der ursprünglichen Probenhöhe. Dabei entwickelt sich in den tonhaltigen Anhydritgesteinen im Verlaufe der Zeit ein relativ grobkristallines Gipsgemenge, welches den Ton durchwächst. Das Quellmass ist abhängig von der entstandenen Gipsmenge (Fig. 19). Der Anteil Gips und somit auch das Quellmass wird durch den Tongehalt bestimmt. In Fig. 20 sind die Quellmassversuche der tonigen Sulfatgesteine mit unterschiedlichem Tongehalt aufgetragen. Die Quellmassversuche sind zudem einzeln im Anhang A17, A19, A22 und A26 dargestellt.

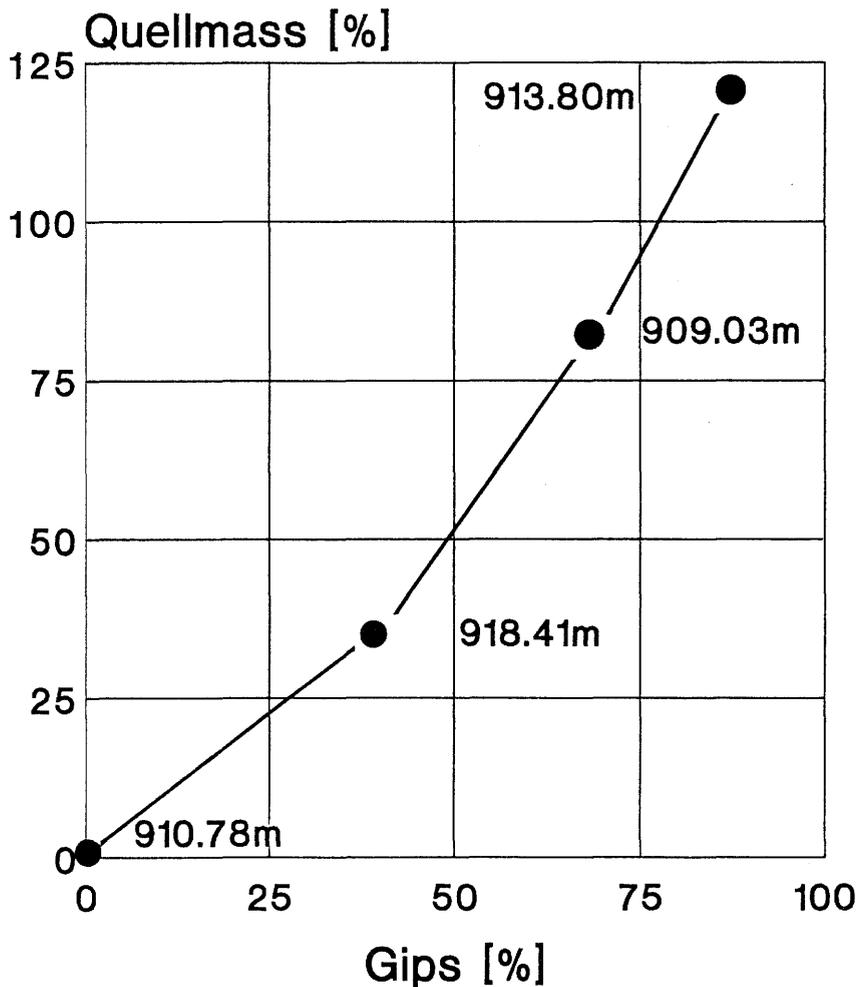


Fig. 19: Quellmass in Abhängigkeit der Gipsentstehung. Proben aus Bohrung Weiach mit Angabe der Tiefe.

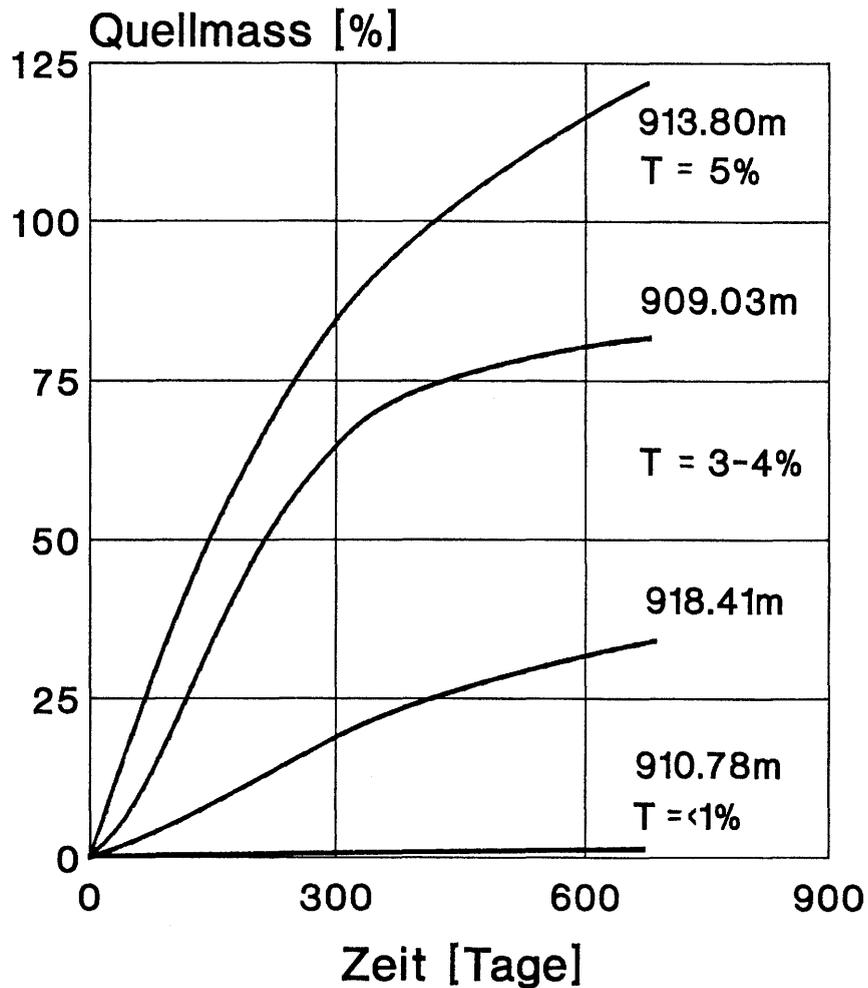


Fig. 20: Quellmass von tonhaltigen Anhydritproben unter unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung in Abhängigkeit der Zeit. T = Tongehalt in Gew.%.

7.2.3 Einfluss des Gefüges auf das Quellverhalten

Das Gefüge trägt über die Wasserzugänglichkeit, die angreifbare Oberfläche und die Lage der quellenden Anhydritschichten wesentlich zum Quellverlauf des mineralogischen Quellpotentials bei. Die Untersuchung von sedimentären und tektonischen Strukturen in Sulfatgesteinen ist nicht einfach, denn aufgrund der Rheologie der Mergel und Sulfatgesteine kann durch Kompetenzinversion vom frühdiagenetischen Zustand bis zur posttektonischen Vergipsung ein mehrmaliger Strukturwechsel stattgefunden haben (Nüesch und Baumann, 1989). Die Wechsellagerung von Anhydrit- und Mergellagen des Probenmaterials von Weiach wird vereinfacht

als sedimentär betrachtet. Die Anhydritproben vom Valkastielstollen (Walgau) werden als tektonisch überprägt betrachtet aufgrund der zerrissenen Tonklasten in der Anhydritmatrix.

Der Einfluss des Gefüges kann anhand des Quellverhaltens von drei mineralogisch vergleichbaren Anhydritproben gezeigt werden (Fig.21). Innerhalb der ersten 150 Tage quillt die "massige" Probe 40440/1 am stärksten. Nach 150 Tagen wurde der Quelldruck der feingeschichteten Probe grösser. Erst nach 800 Tagen hatte die aus dem Probenmaterial der Probe 40440/1 gesinterte Probe die höchsten Quelldrücke. Aus der Menge des während des Quellversuchs entstandenen Gipses kann nicht auf den Quelldruck zurückgeschlossen werden. 7% Gips an der entscheidenden Stelle (z.B. zwischen den Schichten) bewirkt einen grösseren Quelldruck als die doppelte Gipsmenge als Gipshaut um die Probe.

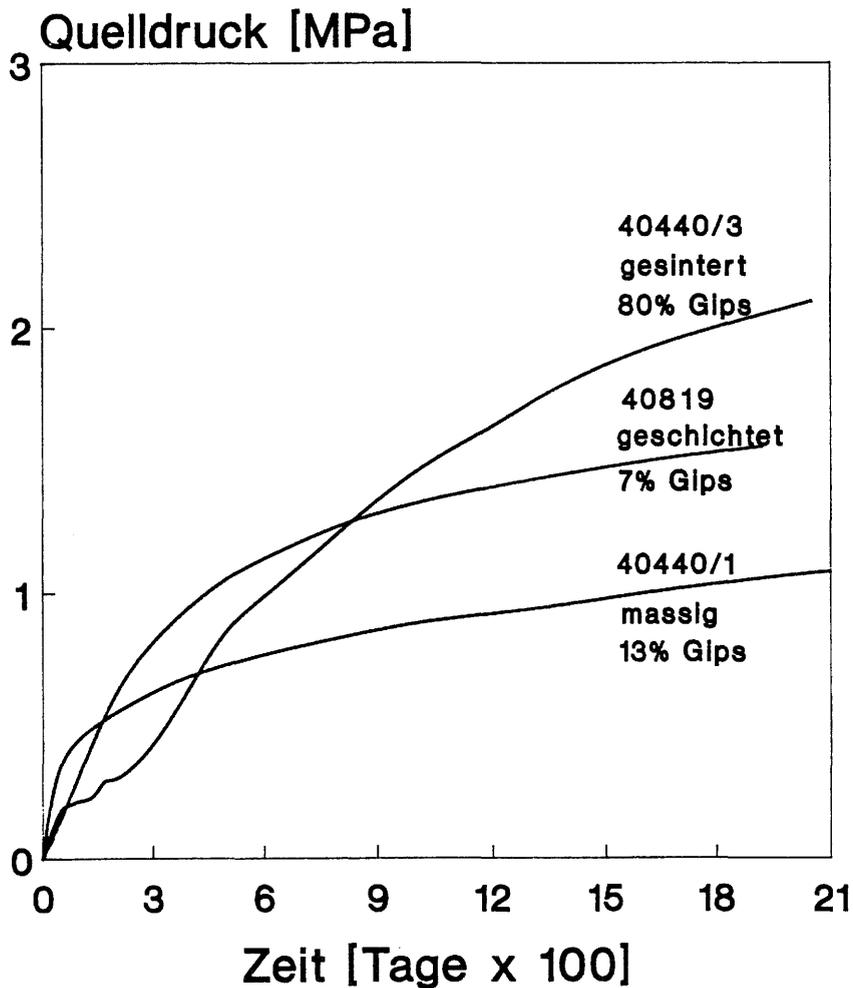


Fig. 21: Einfluss des Gefüges auf das Quellverhalten.

8 INTERPRETATION DER ERGEBNISSE

8.1 Opalinuston

Untersuchungen an Opalinuston zeigten, dass vor allem folgende Faktoren die Quellparameter massgeblich bestimmen:

- Überlagerungsdruck
- Menge und Art der Tonminerale

Gesteine aus z.B. 300 m Tiefe zeigen höhere Quelldrücke und Quellmasse als anstehende Gesteine. Proben, welche nahe der Terrainoberfläche entnommen werden, sind entlastet, haben Wasser aufgenommen und sind gequollen.

Da der Quelldruck hauptsächlich vom **Abstand** zwischen den Tonteilchenoberflächen (oder Elementarschichten bei den quellfähigen Tonmineralen) abhängig ist, das Quellmass hingegen hauptsächlich von der **Menge** der Tonteilchen (oder Elementarschichten bei den quellfähigen Tonmineralen) in der Probe, wird der Quelldruck stärker vom Überlagerungsdruck beeinflusst als das Quellmass.

In Fig. 12 sind die Quelldrücke von Opalinustonproben aus einer Sondierbohrung in Abhängigkeit der Entnahmetiefe dargestellt. Die Zunahme des Quelldrucks mit der Tiefe ist deutlich zu erkennen. Bei der Beurteilung dieser Tatsache muss allerdings auch die Änderung des Schichtfallens von 70°-80° oben bis etwa 30°-40° unten mitberücksichtigt werden. Quelldrücke senkrecht zur Schichtung sind wegen der Einregelung der Tonteilchen etwas höher als solche parallel zur Schichtung.

Für Proben aus der gleichen Entnahmetiefe - in einem Tunnel beispielsweise - werden die Quellparameter von der Menge und Art der Tonminerale im Gestein bestimmt. Die Erfahrung lehrt, dass Gesteine mit weniger als etwa 25% Tonfraktion ein kleines Quellpotential aufweisen. Gesteine mit 25-50% Tonfraktion sind als mittel bis stark quellfähig zu bezeichnen. Tongesteine mit mehr als 50% Tonfraktion sind eher selten, haben aber dafür ein grosses Quellpotential.

Nebst der Menge Ton in einem Gestein spielt auch die **Art** der Tonminerale eine grosse Rolle beim Quellverhalten.

Gesteine mit quellfähigen Tonmineralen wie Montmorillonit haben ein grösseres Quellpotential als solche mit nicht quellfähigen Tonmineralen wie beispielsweise Illit und Kaolinit, dies als Folge der unterschiedlichen Grösse der für Wasser zugänglichen spezifischen Oberfläche der Tone. Montmorillonite haben spezifische Oberflächen von bis zu etwa $750\text{m}^2/\text{g}$, währenddem Illit höchstens $100\text{m}^2/\text{g}$ und Kaolinit etwa $30\text{m}^2/\text{g}$ aufweist.

Der Opalinuston mit seinen Mixed layer Mineralen von Illit/Montmorillonit und Illit, Kaolinit und Chlorit hat mit einer spezifischen Oberfläche von etwa $135\text{m}^2/\text{g}$ eine Zwischenposition. Der Opalinuston wird deshalb als weniger quellfähig als die Obere Süsswassermolasse, welche Montmorillonit enthält, beurteilt.

Untersuchungen an Opalinuston (Madsen and Müller-Vonmoos, 1985) ergaben eine stark vereinfachte Quelldruckbestimmung anhand von Parametern aus mineralogischen Untersuchungen. So ist beispielsweise bei Opalinuston der Zusammenhang zwischen mineralogischer Zusammensetzung und Quelldruck hinreichend bekannt. In diesem Falle bestimmt der natürliche Wassergehalt und die spezifische äussere Oberfläche einer Probe die Grössenordnung des Quelldruckes.

8.2 Tonige Sulfatgesteine

Die **Mineralogie** bestimmt das Quellpotential: Diese Aussage geht aus den Messresultaten der Quelldrücke von tonhaltigen Anhydritproben unterschiedlicher Zusammensetzung hervor (Fig. 18 und 22). Dabei ist der Tongehalt $<20\%$ für den Quelldruck entscheidend. Eindrücklich zeigen Quellmassversuche die Zunahme der Quellhebung in Abhängigkeit der Tongehalte im Bereich von Prozenten (Fig. 20).

Das **Gefüge** bestimmt den zeitlichen Verlauf und die Ausnützung des vorhandenen Quellpotentials. Der rasche Aufbau des Quelldrucks bei der massigen Probe gegenüber der gesinterten resp. der feingeschichteten wird auf die äussere Vergipsung zurückgeführt und auf den vorhandenen Porenraum, in dem Gips auskristallisieren kann (Fig. 21). Der Porenraum ist bei feingeschichtetem Anhydrit grösser als bei massigem und kommt durch Bruch-Spaltflächen und die Schichtung erst in einem späteren Zeitpunkt (nach ca. 150 Tagen) zur vollen Wirkung. Der Nachschub von Wasser entlang der Spaltflächen (Beilage 2, Fototafel 4, Abb. b) wird durch die Gipskristallisation zunehmend behindert, was sich in der Abnahme des Quelldruckes (Abflachen der Quelldruck

kurve) äussert. Nach einer weiteren Zeitspanne kann ein fast lineares Ansteigen der Quelldruckkurven beobachtet werden, welches für die drei Gesteinsproben verschieden ist (nach ca. 600 Tagen bei der massigen, 1000 Tagen bei der feingeschichteten und nach über 1500 Tagen bei der gesinterten Anhydritprobe). Dieser lineare Anstieg wird als Gleichgewichtsprozess der eigentlichen Vergipsung und dem Wassernachschub verstanden, welcher auch nach über 6 Jahren Versuchsdauer nicht zum Stillstand kam.

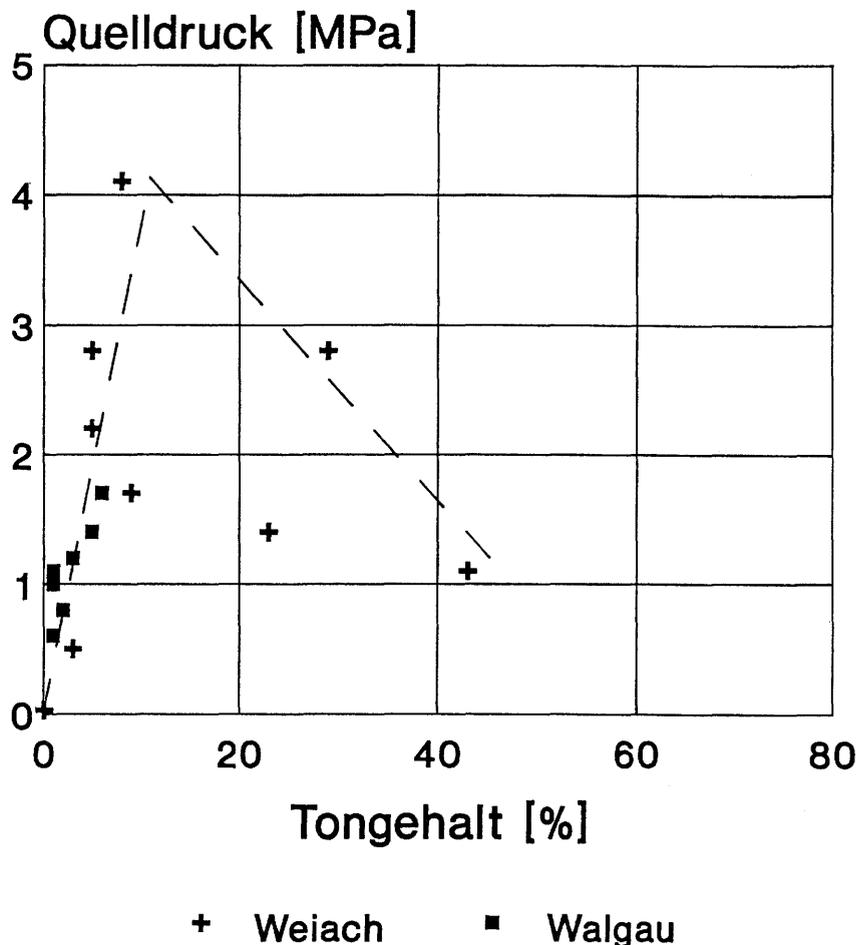


Fig. 22: Quelldruck von tonhaltigen Anhydritproben nach 600 Tagen in Abhängigkeit des Tongehaltes.

Aus den Versuchen resultiert ein Quelldruckmaximum für feingeschichtete tonige Anhydritgesteine mit einem Tongehalt von <20%. Dieses Quelldruckmaxima in Abhängigkeit des Tongehaltes und des Gefüges weist auf die Bedeutung der Tone bei der Vergipsung hin. Der Zusammenhang geht

experimentell aus der entstandenen Gipsmenge hervor (Fig.23) und wird folgendermassen begründet: Der Quellvorgang wird durch die grosse Tonoberfläche begünstigt. Die Kristallisation von Gips wird durch angelagerte Wasserschichten und durch Ionenaustausch gefördert, und dabei ermöglicht das spröde Verhalten der Tongesteine und Mergel eine zusätzliche gute Wasserzirkulation.

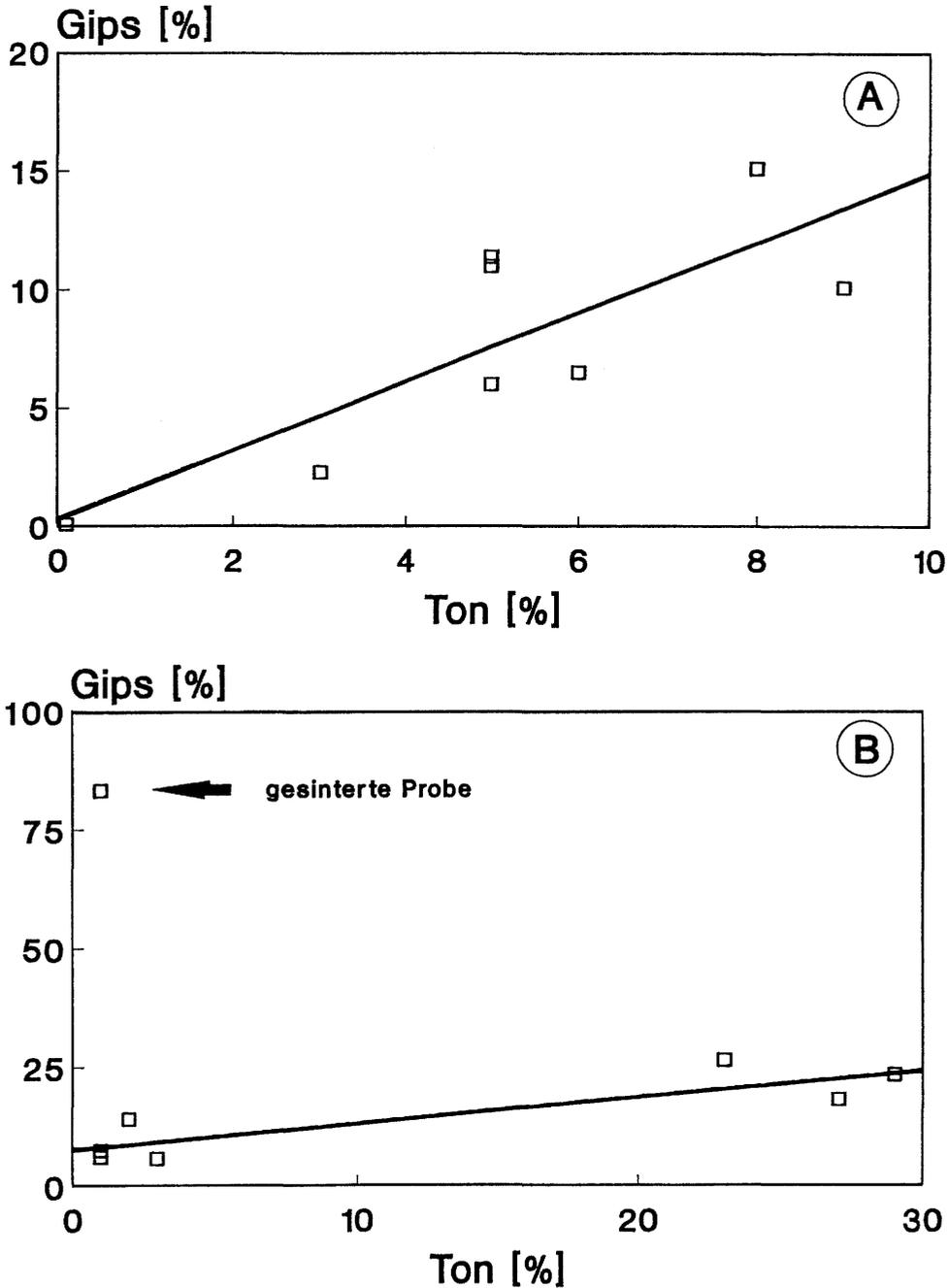


Fig. 23: Gipsgehalt tonhaltiger Anhydritproben nach Quellversuch in Abhängigkeit des Tongehaltes.
 A: Gipsgehalt nach 640-933 Tagen.
 B: Gipsgehalt nach 1540-2099 Tagen.

9 **LITERATURVERZEICHNIS**

Beck, A. und Golta, A. 1972: Tunnelanierungen der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweiz. Bauzeitung 36, Sonderdruck.

Bläsi, H. R. und Matter, A. 1988: Sondierbohrung Weiach Geologie. Nagra Tech. Ber. NTB 86-01.

Brindley, G. W. and Brown, G. 1984: Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification. Mineralogical Society, London.

Grob, H. 1972: Schwelldruck im Belchentunnel. In: Grob, H. und Kovari, K. Berichte, Internationales Symposium für Untertagebau, Luzern, 98-119.

Hardie, L. A. 1967: The Gypsum-Anhydrite Equilibrium at One Atmosphere Pressure. The American Mineralogist, Vol. 52, 171-200.

Huder, J. und Amberg, G. 1970: Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweiz. Bauzeitung 43, 975-980.

Loacker, H. 1986: Geologische Beschreibung des Walgstollens (Vorarlberg, Österreich). Mitt. österr. geol. Ges. 78, 211-230.

MacKenzie, R. C. 1951: A Micromethod for Determination of Cation Exchange Capacity of Clay. J. Colloid Sci., 6, 219-222.

Madsen, F. T. 1976: Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldruckes nach der DLVO-Theorie. Mitt. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Nr. 108. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Madsen, F. T. 1977: Surface Area Measurements of Clay Minerals by Glycerol Sorption on a Thermobalance. Thermochemica Acta, 21, 89-93.

Madsen, F. T. 1979: Determination of the Swelling Pressure of Claystones and Marlstones using Mineralogical Data. Proc. 4th Int. Conf. on Rock Mechanics, Montreux.

Madsen, F. T. and Müller-Vonmoos, M. 1985: Swelling pressure calculated from mineralogical properties of a Jurassic opalinum shale, Switzerland. Clays and Clay Min., 6., 501-509.

Madsen, F. T. und Nüesch, R. 1989: Quellende Gesteine, Quellmechanismen und die Bestimmung massgebender Quellparameter im Labor. Juradurchquerungen - aktuelle Tunnelprojekte im Jura. Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik, 119, 31-42.

Mehra, O. P. and Jackson, M. L. 1960: Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite- Citrate-System buffered with Sodium Bicarbonate. Clays Clay Min., Proc. 7th Nat. Conf., 317-327.

Müller, W. H. und Briegel, U. 1977: Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit. Bericht Nr. 2, Geolog. Institut der ETH Zürich, Arbeitsgruppe Anhydrit der NAGRA.

Müller-Vonmoos, M. 1971: Zur Korngrössenfraktionierung tonreicher Sedimente. Beitr. Geologie der Schweiz 54, 245-257.

Nüesch, R. und Baumann, W. 1989: Ton- und Sulfatgesteine in Wechselwirkung bei Deformation. Geol. Rundschau 78/2, 443-457.

Piper, C. S. 1944: Soil and Plant Analysis. Interscience Publishers Inc. New York.

Posnjak, E. 1938: The System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$. Amer. J. Sci., Ser. 5, Vol. 35A, 247-272.

Weiss, A., Thielepape, W., Göring, G., Ritter, W. und Schäfer, H. 1963: Kaolinit-Einlagerungsverbindungen. Proc. Int. Clay Conf., Stockholm, Sweden, 287-305.

PROBENVERZEICHNIS

Bohrung Weiach:

Entnahmetiefe (m)	Labor Nr.	Geol. Identifikation
646,32-646,55	40852	Unt. Opalinuston
646,55-646,80	40853	Unt. Opalinuston
902,01	40865	Anhydritgruppe
909,03	40868	
910,78	40869	
912,67	40870	
913,80	40871	
915,41	40873	
916,61	40874	
918,41	40876	
919,77	40900	Anhydritgruppe

Walgauwerk, Valkastielstollen:

Entnahmeort (Station)	Labor Nr.	Geol. Identifikation
1823	40440/1	Raibler Gips
1823	40440/3	Oberostalpin)
1953/2h-3	40816	
1953/8h-1	40856	
1983/10h-7	40860	
2155/8h-3	40819	
unbekannt	41125	Raibler Gips

PROBENVERZEICHNIS

Opalinuston, Proben für Mineralogie aus früheren Untersuchungen (Madsen, 1976 und Madsen and Müller-Vonmoos, 1985):

Bohrung	Entnahmetiefe (m)	Labor Nr.	Geol. Identifikation
20	13	32840	Opalinuston
20	24	32844	
20	26	32845	
20	30	32847	
20	33	32850	
20	34	32851	
20	39	32853	
20	85	32965	Opalinuston
5256.20	81	39418	Opalinuston
5256.20	89	39420	
5256.20	106	39427	Opalinuston
3	127	32773	Opalinuston
3	128	32774	
3	130	32775	
3	135	32779	
3	136	32780	
3	138	32782	
3	141	32783	
3	155	32810	Opalinuston

PROBENVERZEICHNIS

Opalinuston, Proben für Quellversuche aus früheren Untersuchungen. Bözbergtunnel (Madsen und Nüesch, 1989):

Bohrung	Entnahmetiefe (m)	Labor Nr.	Geol. Identifikation
5256.20	29	39361	Opalinuston
5256.20	33	39362	
5256.20	42	39363	
5256.20	43	39364	
5256.20	48	39365	
5256.20	53	39366	
5256.20	53	39367	
5256.20	61	39368	
5256.20	62	39369	
5256.20	81	39418	
5256.20	86	39419	
5256.20	89	39420	
5256.20	91	39421	
5256.20	93	39422	
5256.20	94	39423	
5256.20	97	39424	
5256.20	99	39425	
5256.20	105	39426	
5256.20	106	39427	Opalinuston

OPALINUSTON

Resultate der Quelldruckversuche

Bohrung Weiach :

Labor Nr.	Entnahme- Tiefe (m)	Versuchs- dauer (Tage)	Quelldruck nach 1 Tag (MPa)	Quelldruck b. Ausbau (MPa)
40851	646.32	26	0.1	0.3
40852	646.55	26	0.8	1.1

Bohrung 5256.20 Bözbergtunnel. Resultate aus früheren Untersuchungen:

39361	29	8	0.2	0.2
39362	33	16	0.1	0.1
39363	42	16	0.7	0.7
39364	43	16	0.8	0.8
39365	48	16	0.8	0.8
39366	53	16	0.4	0.6
39367	53	16	0.9	1.0
39368	61	16	0.7	0.8
39369	62	10	0.9	0.9
39418	81	8	1.0	1.3
39419	86	8	1.0	1.0
39420	89	6	1.6	1.7
39421	91	8	0.9	1.0
39421/1	91			1.3
39421/2	91			1.3
39422	93	8	1.0	1.1
39423	94	8	1.1	1.2
39424	97	8	1.3	1.3
39425	99	8	0.3	0.5
39426	105	8	0.8	0.9
39427	106	8	0.7	1.0

Luftgetrocknete Proben:

39422/1	93			2.8
39423/1	94			> 3.0
39427/1	106			3.6

OPALINUSTON

Resultate der Quellmassversuche

Bohrung Weiach:

Labor Nr.	Entnahme- tiefe (m)	Versuchs- dauer (Tage)	Quellmass nach 1 Tag (%)	Quellmass b. Ausbau (%)
40852	646,32	128	2.3	4.6
40853	646,55	128	2.3	4.5

Bohrung 5256.20 Bözbergtunnel. Resultate aus früheren Untersuchungen:

39361	29	24	0.6	0.9
39362	33	24	2.8	3.9
39363	42	32	3.5	5.8
39364	43	45	5.3	8.8
39365	48	44	2.0	3.7
39366	53	44	1.6	3.5
39367	53	44	2.1	3.6
39368	61	44	2.0	3.7
39369	62	44	1.8	3.8
39418	81	32	1.3	3.0
39419	86	32	1.8	2.8
39420	89	32	2.0	3.6
39421	91	32	2.5	4.3
39422	93	32	1.5	2.9
39423	94	32	2.0	4.5
39424	97	32	0.9	3.5
39425	99	32	2.1	5.0
39426	105	32	0.8	2.8
39427	106	32	1.4	3.0

TONIGE SULFATGESTEINE
Resultate der Quelldruckversuche

Bohrung Weiach:

Labor Nr.	Entnahme- tiefe	Versuchs- dauer	Quelld. 600 Tg	Quelld. Ausbau	Axiale Deform. Ausbau
	(m)	(Tage)	(MPa)	(MPa)	(%)
40865	902,01	1540	1.4	2.5	2.28
40868	909,03	670	2.2	2.3	1.44
40869	910,78	690	0.03	0.03	0.04
40870	912,67	690	1.7	1.9	1.12
40871	913,80	690	4.1	4.4	2.00
40873	915,41	640	2.8	2.9	1.61
40874	916,61	1540	1.1	1.6	1.12
40876	918,41	690	0.5	0.6	0.24
40900	919,77	1620	2.8	4.1	2.79

**Walgauwerk,
Valkastielstollen:**

Station					
40440/1	1823	2099	0.8	1.1	0.41
40440/3	1823	2099	1.0	2.1	0.93
40816	1953/2h-3	1928	1.2	1.8	0.96
40856	1953/8h-1	770	1.7	1.8	1.05
40860	1983/10h-7	933	1.4	1.4	0.72
40819	2155/8h-3	1928	1.1	1.5	1.06
41125	unbekannt	1681	0.6	1.0	1.31

TONIGE SULFATGESTEINE
Resultate der Quellmassversuche

Bohrung Weiach:

Labor Nr.	Entnahme- tiefe (m)	Versuchs- dauer (Tage)	Quellmass 600 Tage (%)	Quellmass Ausbau (%)
40868	909,03	686	81.5	82.1
40869	910,78	686	0.7	0.7
40871	913,80	686	115.7	120.5
40876	918,41	686	33.5	35.3

Ausgangsmaterial für Quellversuch repräsentiert durch die unmittelbar benachbarte Probe

Tabelle A-8: Korrigierte¹ Mineralintensitäten der Pulveraufnahmen von Proben für Quellversuche

Lab.Nummer	Tiefe m	Anhydrit	Gips	Dolomit	Feldspat
Weiach					
40865	902.01	111	0.1 ²	13	0.3
40868a	909.03	111	Ø	2	0.3
40868/1a	909.03	111	Ø	2.7	0.4
40869/2a	910.78	111	Ø	0.8	0.1
40869a	910.78	111	Ø	Ø	Ø
40870a	912.67	111	Ø	17.7	0.1
40870/1a	912.67	111	Ø	10.1	Ø
40871a	913.80	111	Ø	4.4	0.2
40873a	915.41	111	Ø	Ø	0.1
40874a	916.61	30.7	Ø	59.6	5.3
40876a	918.41	111	Ø	2.4	0.6
40900a	919.77	111	Ø	4.7	0.3

Tabelle A-9: Karbonat-Bestimmung nach Passon

Lab.Nummer	Tiefe m	Karbonat Gew. %
Weiach		
40865	902.01	25
40868a	909.03	0.9
40868/1a	909.03	2.5
40869/2a	910.78	0.7
40869a	910.78	Ø
40870a	912.67	14.7
40870/1a	912.67	9.3
40871a	913.80	7.3
40873a	915.41	Ø
40874a	916.61	8.5
40876a	918.41	6.6
40900a	919.77	18.5

¹ Mineralintensität = $I/(I_{max} \cdot \text{Intensitätsfaktor})$ mit folgenden Intensitätsfaktoren:
Anhydrit = 0.9, Gips = 0.4, Dolomit = 1.5, Feldspat = 4.3

² einziger röntgenographischer Hinweis auf Gips ansonsten Ø = nicht nachgewiesen

Tabelle A-10: Fraktion <0.002mm und deren qualitative Zusammensetzung

Lab.Nummer	Tiefe m	Kopecky <2µm	Pipette <2µm	Tonmineralzusammensetzung				Akz.
				Corrensit	Smectit	Chlorit	Illit	
Weiach								
40865	902.01	18.1	27.2	∅	x	xx	x	xx
40868a	909.03	25.1	25.7	∅	∅	x ³	xx	xxx
40868/1a	909.03	27.2	38.8	-	-	-	-	-
40869/2a	910.78	7.9	18.9	∅	∅	x	x	xxx
40869a	910.78	0.9	3.2	∅	∅	x	x	xx
40870a	912.67	3.9	11.8	x	∅	x	x	xx
40870/1a	912.67	3.9	5.8	x	∅	x	x	xxx
40871a	913.80	10.4	22.6	x	∅	xxx	x	xx
40873a	915.41	27.0	16.0	x	∅	x	x	xxx
40874a	916.61	55.5	66.8	∅	∅	x	x	xx
40876a	918.41	2.6	15.7	x	∅	x	x	xx
40900a	919.77	23.9	32.9	x	∅	x	x	xx
Walgau								
40440	1823	-	-	x	x	xx	x ⁴	x
40856	1953	-	-	x	∅	xxx	x	x
40860	1983	-	-	x	∅	xxx	x	x

Anteil der Tonminerale: xxx = sehr viel, xx = viel, x = nachgewiesen, ∅ = nicht nachgewiesen, - = nicht gemessen

Tabelle A-11: Thermogravimetrische und massenspektroskopische Bestimmung (TG/MS) von Gips und Ton, sowie Sulfatgehalt von 3 ausgewählten Proben

Lab.Nummer	Tiefe m	Ton Gew. %	Gips Gew. %	Sulfat ⁵ Gew. %
Weiach				
40865	902.01	16.6	2.8	-
40868a	909.03	19.5	2.0	-
40868/1a	909.03	29.6	3.4	-
40868/2a	910.78	4.0	0.9	82.2
40869a	910.78	1.6	∅	-
40870a	912.67	6.4	0.6	-
40870/1a	912.67	4.2	0.3	-
40871a	913.80	11.4	1.5	-
40873a	915.41	41.3	0.4	80.1
40874a	916.61	80.6	4.3	14.8
40876a	918.41	2.6	0.7	-
40900a	919.77	23.8	2.4	-

³ grobkörniger Chlorit 2-5µm

⁴ Pyrophyllit nachgewiesen

⁵ Sulfatgehalt mit Komplexon bestimmt

Tabelle A-12: Infrarot-Bestimmung (IR) von Kaolinit und Quarz aus Fraktion <0.002mm

Lab.Nummer	Tiefe m	Kaolinit Gew.%	Quarz Gew.%
Weiach			
40865	902.01	Ø	Ø
40871a	913.80	Ø	Ø
40900a	919.77	2.5	2.3
Walgau			
40860	1983	4.8	Ø

Ausgebautes Probenmaterial nach QuellversuchTabelle A-13: Korrigierte¹ Mineralintensitäten aus Pulveraufnahmen von ausgebauten Proben

Lab.Nummer	Tiefe m	Anhydrit	Gips	Dolomit	Feldspat
Weiach					
40865bQd	902.01	36.1	22.9	65.4	1.3
40868bQd	909.03	111	2.8	0.4	0.1
40868bQm	909.03	111	169.2	2.6	0.2
40869bQd	910.78	111	0.2	Ø	Ø
40869bQm	910.78	111	0.2	0.1	Ø
40870bQd	912.67	111	2.7	5.7	0.1
40871bQd	913.80	111	4.6	2.0	0.1
40871bQm	913.80	70.6	250	2.0	0.1
40873bQd	915.41	111	2.9	Ø	0.1
40874bQd	916.61	17.3	22	65.4	2.3
40876bQd	918.41	111	2.9	1.8	0.1
40876bQm	918.41	111	13.2	1.3	0.1
40900bQd	919.77	111	40	10.5	0.9
Walgau					
40860bQd	1983	111	8.6	5.6	0.3
40440/1bQd	1823	111	3.7	0.7	0.3
40440/3bQd	1823	86.7	250	10.9	0.2
40816bQd	1953	111	0.8	0.4	<0.1
40819bQd	2155	111	1	0.1	Ø
40856bQd	1953	111	1.1	6.0	<0.1
41125bQd	unbekannt	111	3.3	19.5	<0.1

¹ Mineralintensität = $I/(I_{max} \cdot \text{Intensitätsfaktor})$ mit folgenden Intensitätsfaktoren:
Anhydrit = 0.9, Gips = 0.4, Dolomit = 1.5, Feldspat = 4.3

Tabelle A-14: Karbonat-Bestimmung nach Passon

Lab.Nummer	Tiefe m	Karbonat Gew. %
Weiach		
40865bQd	902.01	30
40868bQd	909.03	1
40868bQm	909.03	<1
40869bQd	910.78	Ø
40869bQm	910.78	Ø
40870bQd	912.67	12
40871bQd	913.80	8
40871bQm	913.80	2
40873bQd	915.41	Ø
40874bQd	916.61	23
40876bQd	918.41	10
40876bQm	918.41	5
40900bQd	919.77	20
Walgau		
40860bQd	1983	-
40440/1bQd	1823	1
40440/3bQd	1823	1
40816bQd	1953	2
40819bQd	2155	<0.5
40856bQd	1953	6
41125bQd	unbekannt	29

Tabelle A-15: Fraktion <0.002mm und Rückstand nach
Komplexonbehandlung³ (Komplex.)

Lab.Nummer	Tiefe m	Abheb. ⁴ <2µm	Pipette <2µm	Komplex. Rest %	Kopecky <2µm
Weiach					
40865bQd	902.01	27	25	65	-
40868bQd	909.03	-	-	17	-
40868bQm	909.03	-	-	12	-
40869bQd	910.78	-	-	<1	-
40869bQm	910.78	-	-	1	-
40870bQd	912.67	-	-	31	-
40871bQd	913.80	10	10	27	-
40871bQm	913.80	7	7	18	-
40873bQd	915.41	-	-	18	-
40874bQd	916.61	-	-	78	-
40876bQd	918.41	-	-	14	-
40876bQm	918.41	-	-	12	-
40900bQd	919.77	31	31	49	-

³ Sulfat wurde weggelöst⁴ quantitative Bestimmung von <2µm durch Abhebern

Lab.Nummer	Tiefe m	Abheb. ⁴ <2µm	Pipette <2µm	Komplex. Rest %	Kopecky <2µm
Walgau					
40860bQd	1983	-	-	5	7.8
40440/1bQd	1823	2	2	8	-
40440/3bQd	1823	-	-	4	-
40816bQd	1953	-	-	14	-
40819bQd	2155	-	-	6	-
40856bQd	1953	6	6	23	-
41125bQd	unbekannt	-	-	32	-

Tabelle A-16: Thermogravimetrische und massenspektroskopische Bestimmung (TG/MS) von Gips und Ton

Lab.Nummer	Tiefe m	Gips Gew. %	Ton Gew. %
Weiach			
40865bQd	902.01	9.4	-
40868bQd	909.03	4.9	4.9
40868bQm	909.03	59.4	3.2
40869bQd	910.78	Ø	-
40869bQm	910.78	Ø	-
40870bQd	912.67	7	8.6
40871bQd	913.80	11.2	-
40871bQm	913.80	71.3	3.2
40873bQd	915.41	8.9	4.7
40874bQd	916.61	3.8	27.3
40876bQd	918.41	2.0	3.3
40876bQm	918.41	33.9	3.9
40900bQd	919.77	11.7	-
Walgau			
40860bQd	1983	8.5	-
40440/1bQd	1823	13.1	-
40440/3bQd	1823	79.5	1.4
40816bQd	1953	4.6	2.6
40819bQd	2155	6.5	0.8
40856bQd	1953	5.4	-
41125bQd	unbekannt	4.3	1.4

⁴ quantitative Bestimmung von <2µm durch Abhebern

Tabelle A-17: Sulfatbestimmung mittels Komplexon-Behandlung
(Anhydrit = Sulfat minus Gips aus TG/MS)

Lab.nummer	Tiefe m	Anhydrit Gew.%	Gips Gew.%	Sulfat Gew.%
Weiach				
40865bQd	902.01	25	9	34
40868bQd	909.03	78	5	83
40868bQm	909.03	28	60	88
40869bQd	910.78	99	Ø	99
40869bQm	910.78	99	Ø	99
40870bQd	912.67	62	7	69
40871bQd	913.80	62	11	73
40871bQm	913.80	11	71	82
40873bQd	915.41	73	9	82
40874bQd	916.61	18	4	22
40876bQd	918.41	84	2	86
40876bQm	918.41	54	34	88
40900bQd	919.77	39	12	51
Walgau				
40860bQd	1983	70	9	79
40440/1bQd	1823	79	13	92
40440/3bQd	1823	16	80	96
40816bQd	1953	81	5	86
40819bQd	2155	87	7	94
40856bQd	1953	72	5	77
41125bQd	unbekannt	62	4	68

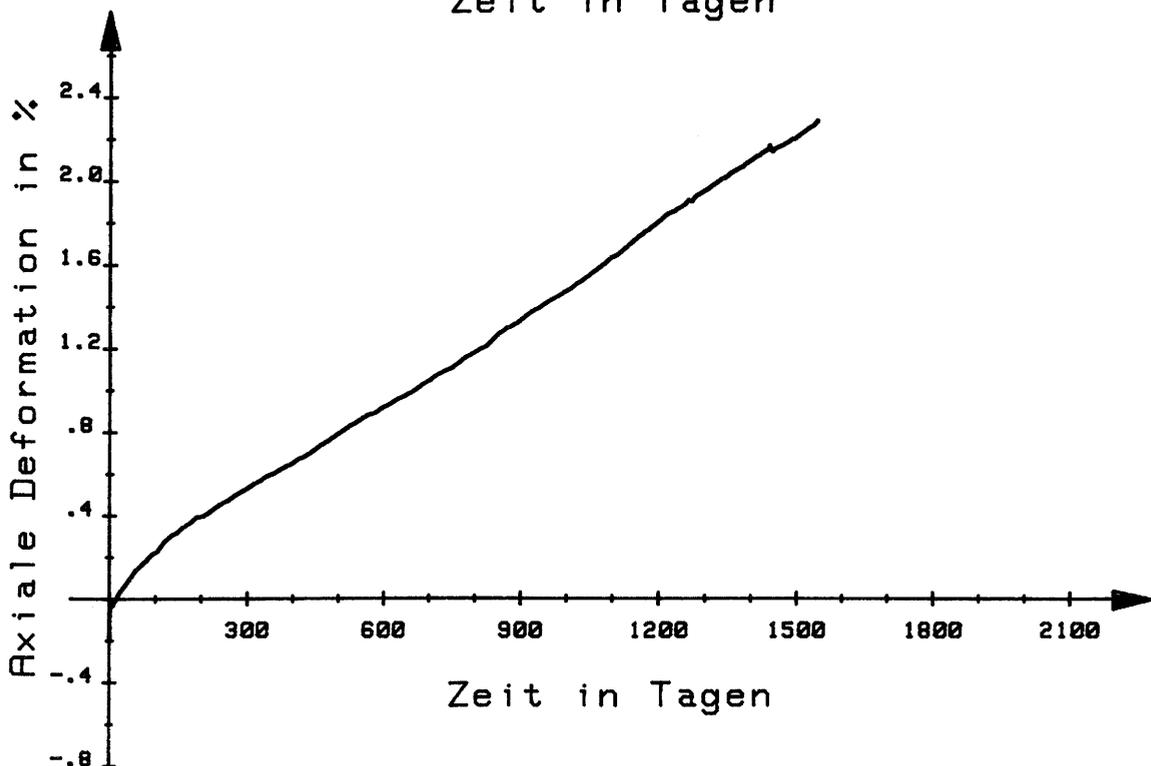
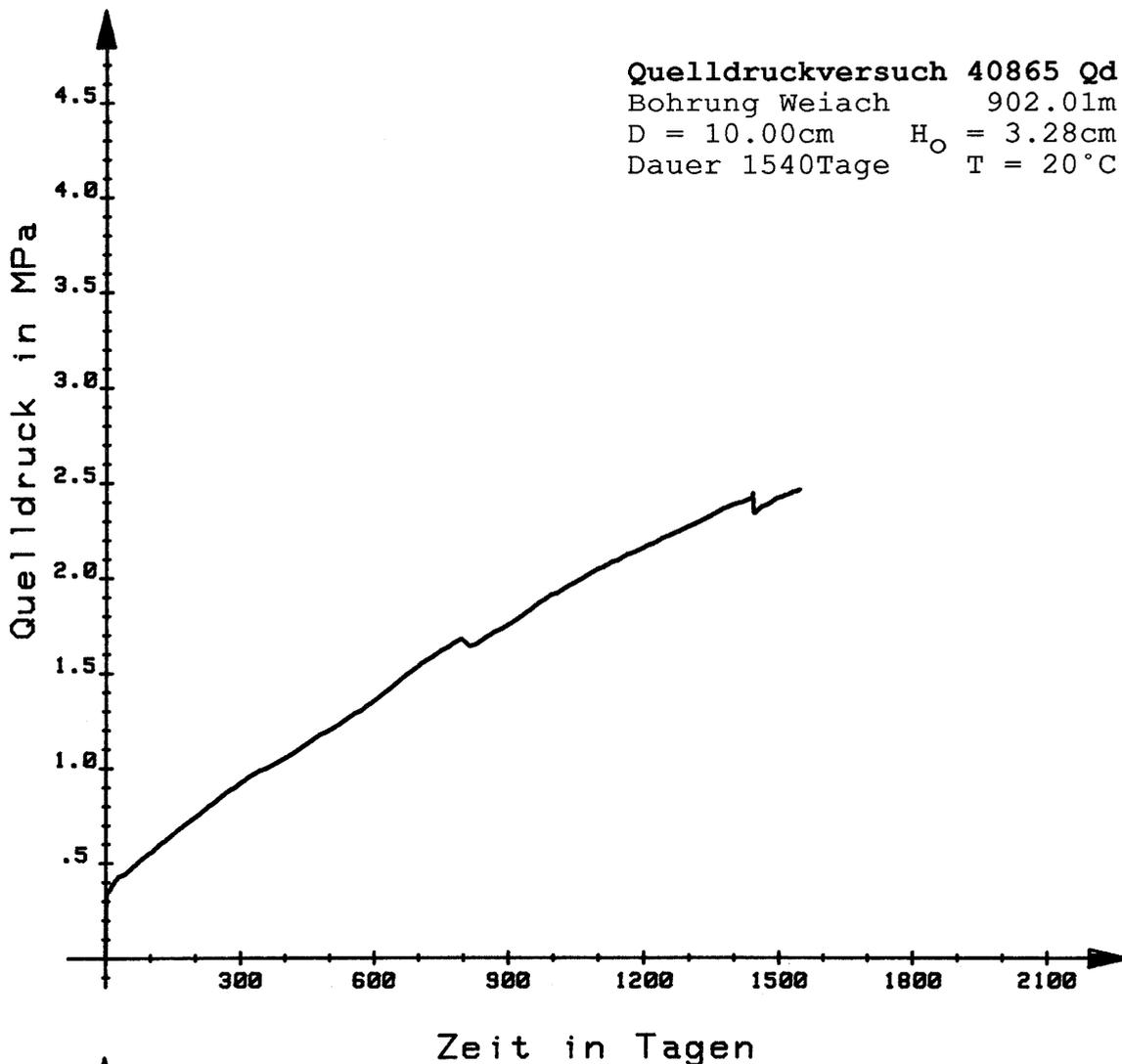
Tabelle A-18: Infrarot-Bestimmung (IR) von Kaolinit und
Quarz aus Fraktion <0.002mm

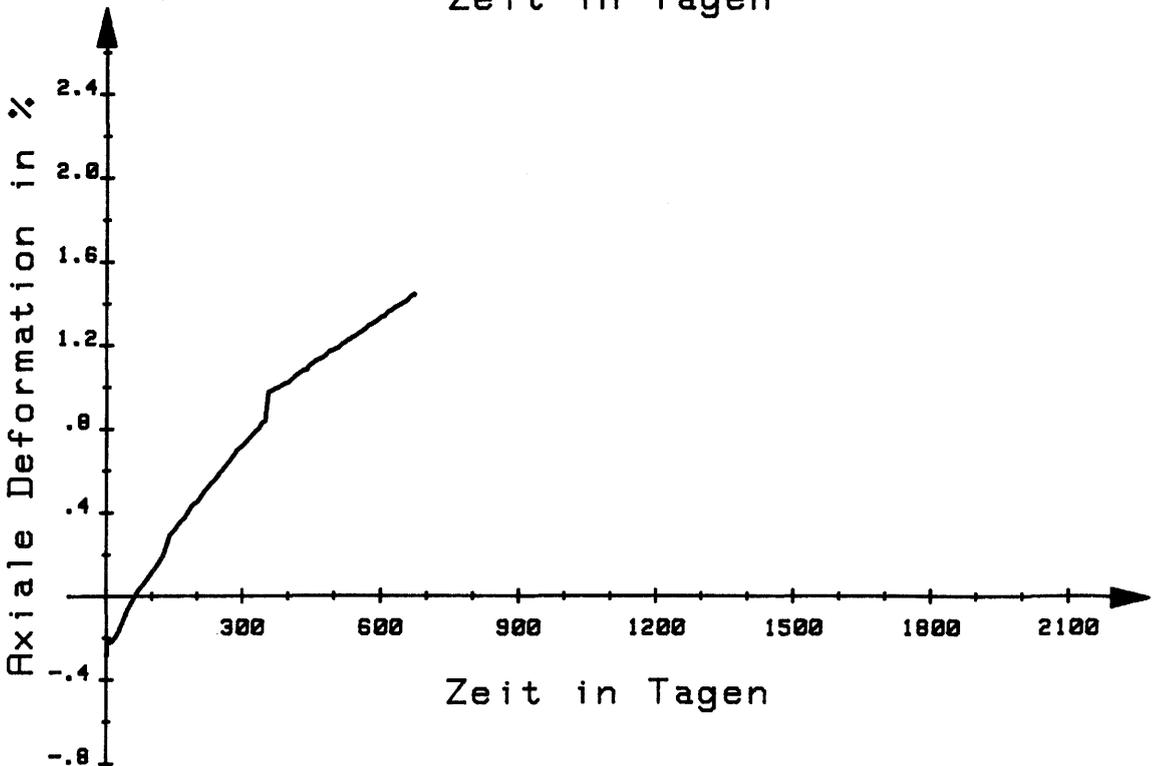
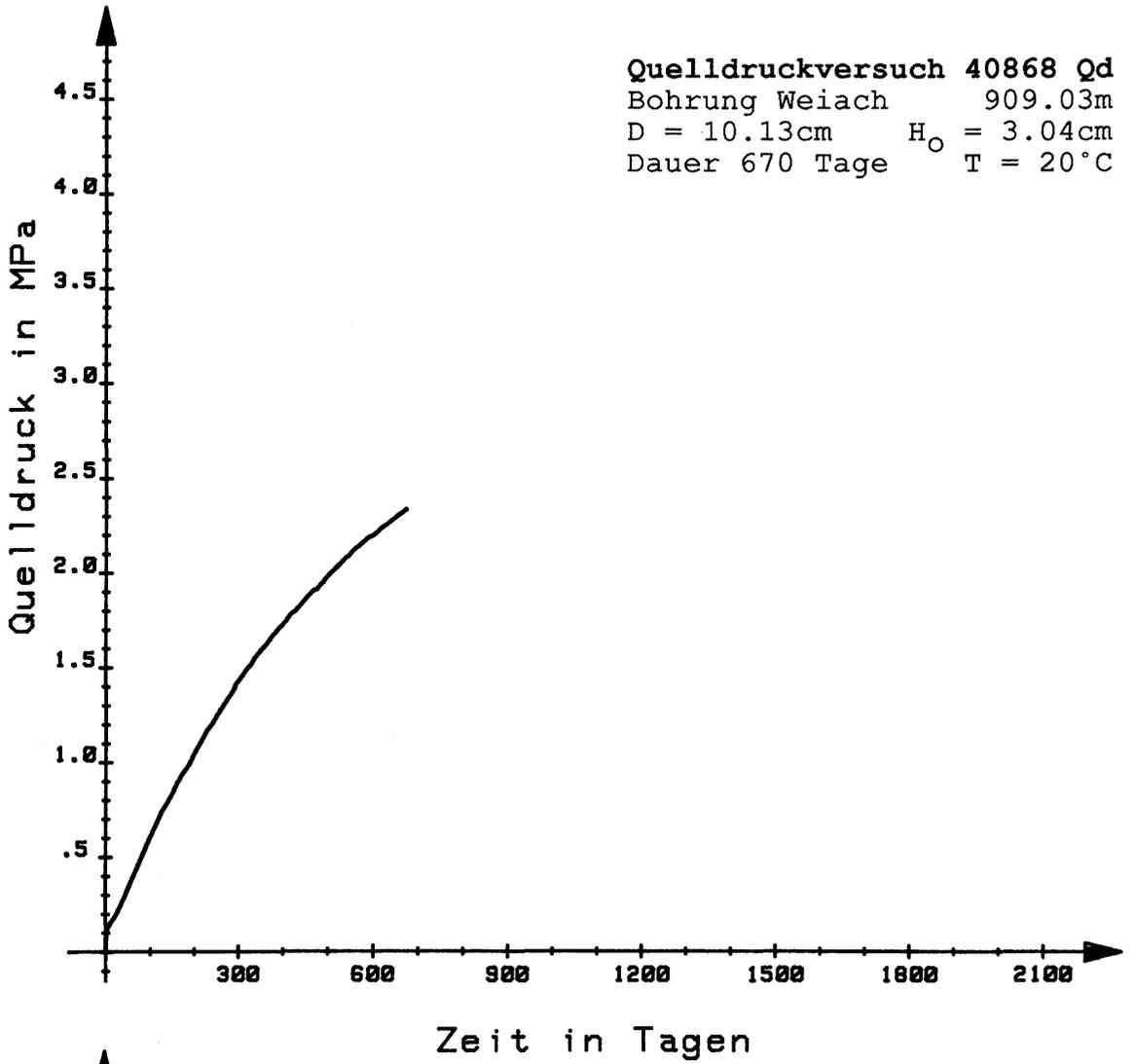
Lab.Nummer	Tiefe m	Kaolinit Gew.%	Quarz Gew.%
Weiach			
40865bQd	902.01	1	1.8
40871bQd	913.80	Ø	1.5
40900bQd	919.77	1.1	<0.1
Walgau			
40440/1bQd	1823	4.6	Ø
40856bQd	1953	3.6	Ø

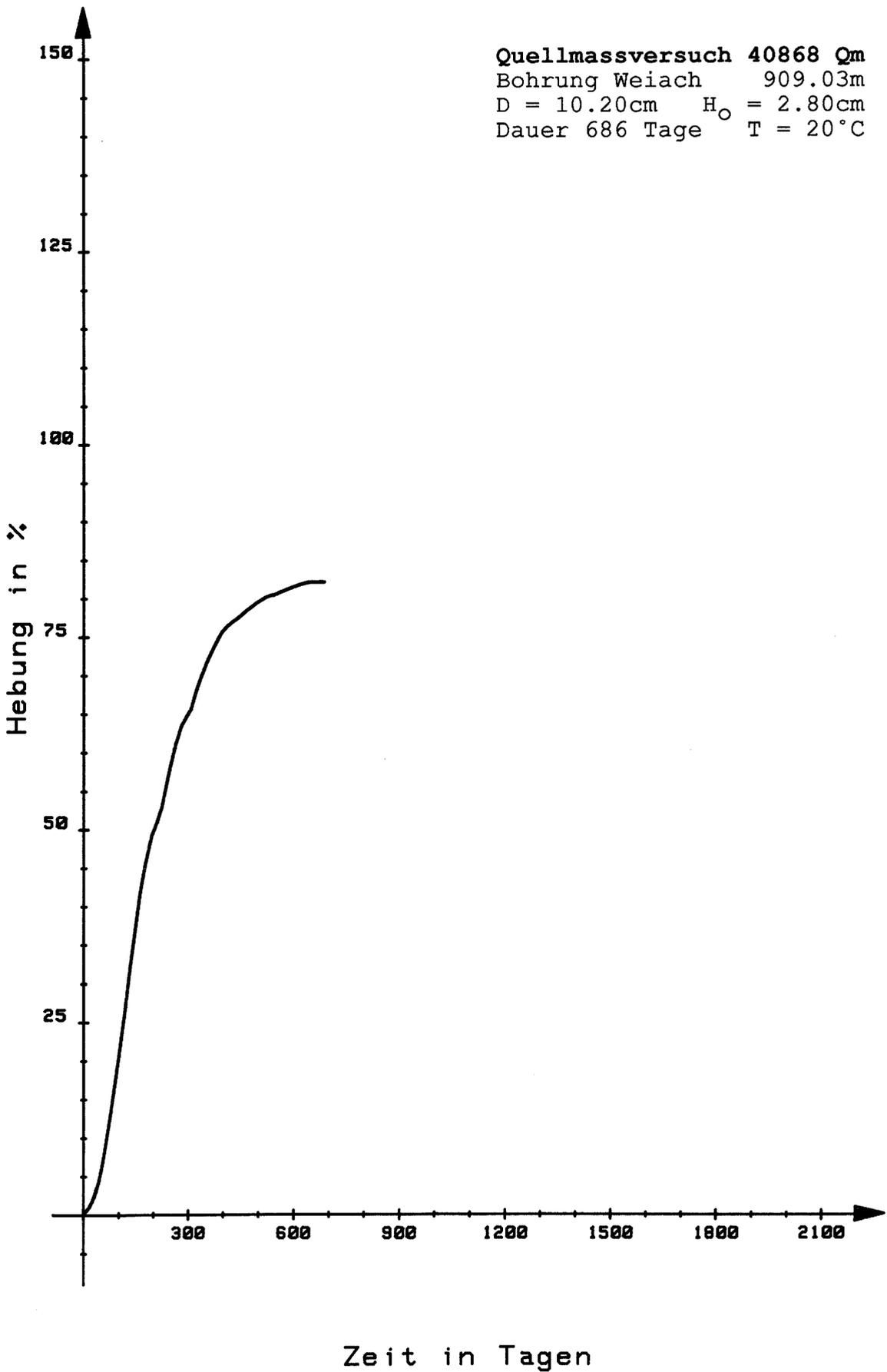
Tabelle A-19: Aeussere Oberfläche (BET) und Anteil der Tonfraktion (<2 μ m) der ausgebauten Proben

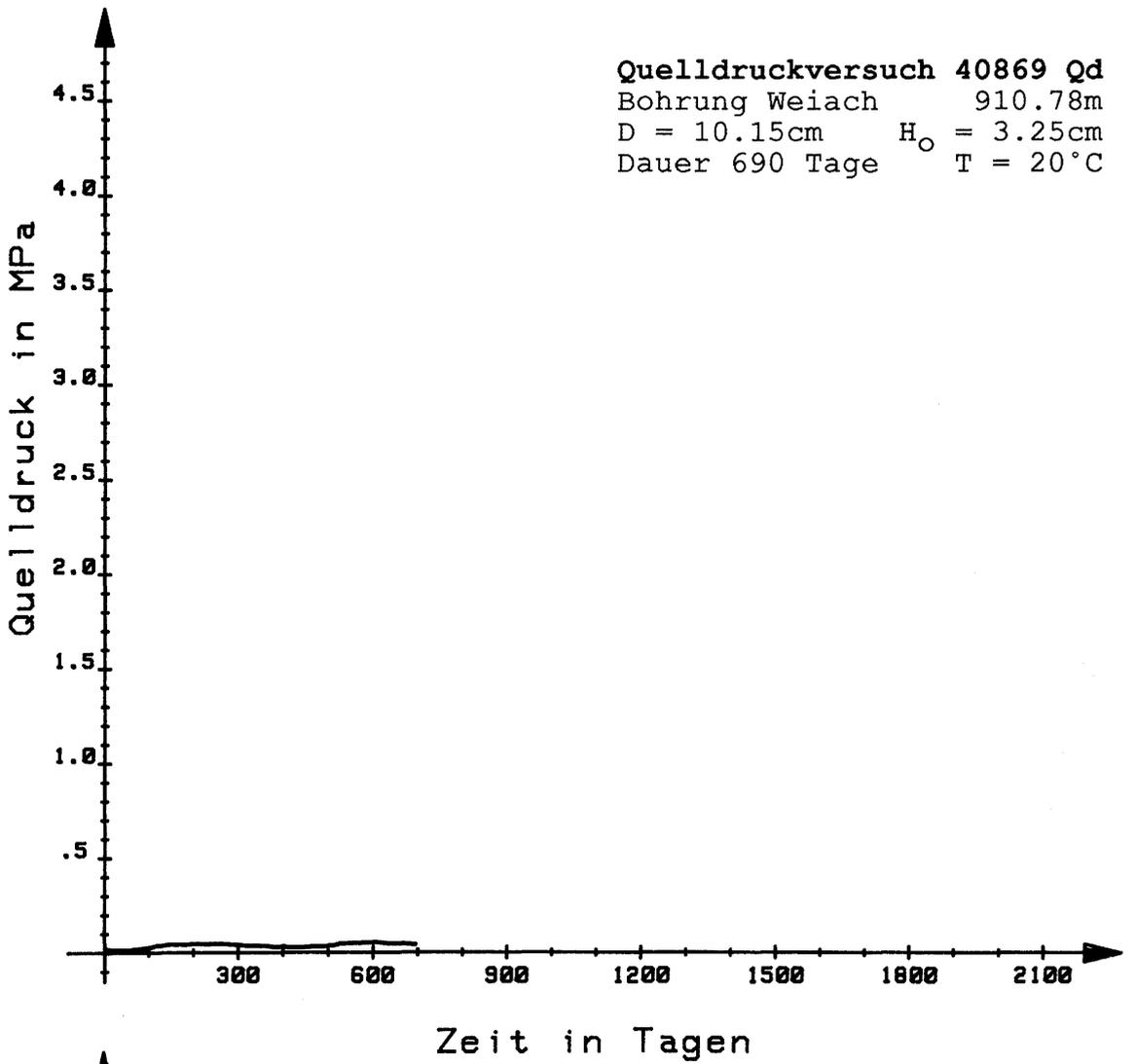
Tiefe m	Lab.Nummer	Oberfläche m ² /g (BET)	Ton Gew.%
Weiach			
902.01*	40865	12.5	17
902.01	40865bQd	13.1	23
909.03	40868bQd	5.8	5
909.03	40868bQm	2.5	3
910.78	40869bQd	-	<1
910.78	40869bQm	-	<1
912.67	40870bQd	6.4	9
913.80*	40871	10.4	11
913.80	40871bQd	9.4	8
913.80	40871bQm	4.7	5
915.41	40873bQd	6	5
916.61	40874bQd	26	43
918.41	40876bQd	3.5	3
918.41	40876bQm	3.5	4
917.77*	40900a	18	24
919.77	40900bQd	23	29
Walgau			
1983	40860bQd	3.5	2
1823	40440/1bQd	3.5	2
1823	40440/3bQd	1	1
1953	40816bQd	2.8	3
2155	40819bQd	2.2	1
1953	40856bQd	4.6	6
unbekannt	41125bQd	4.2	1

*Werte bestimmt am Ausgangsmaterial

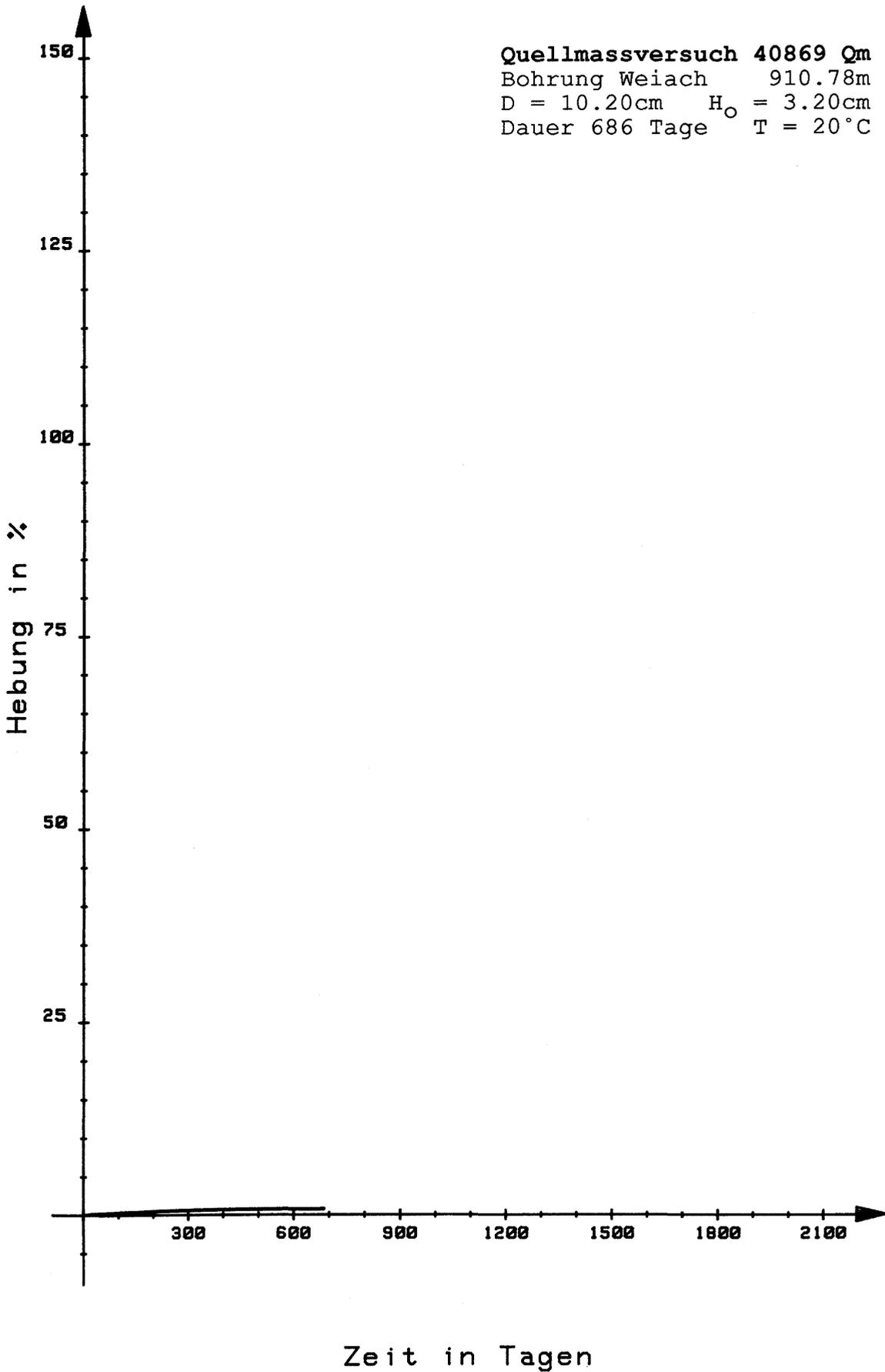


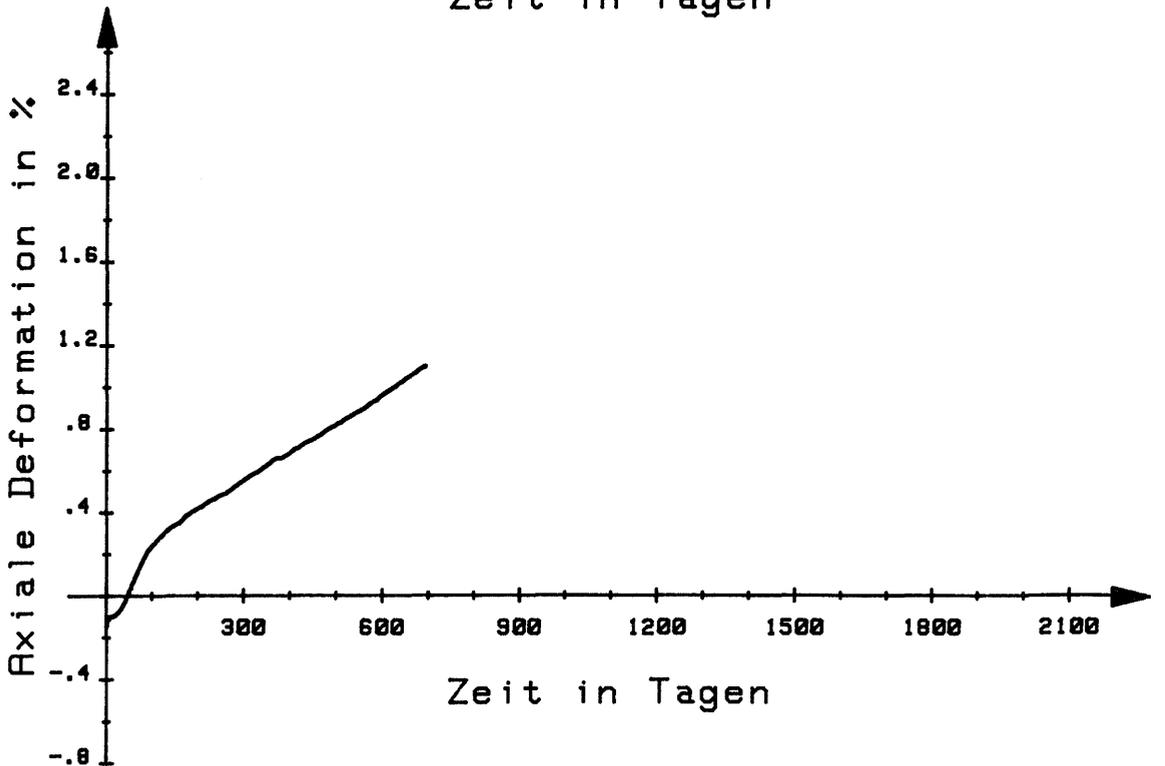
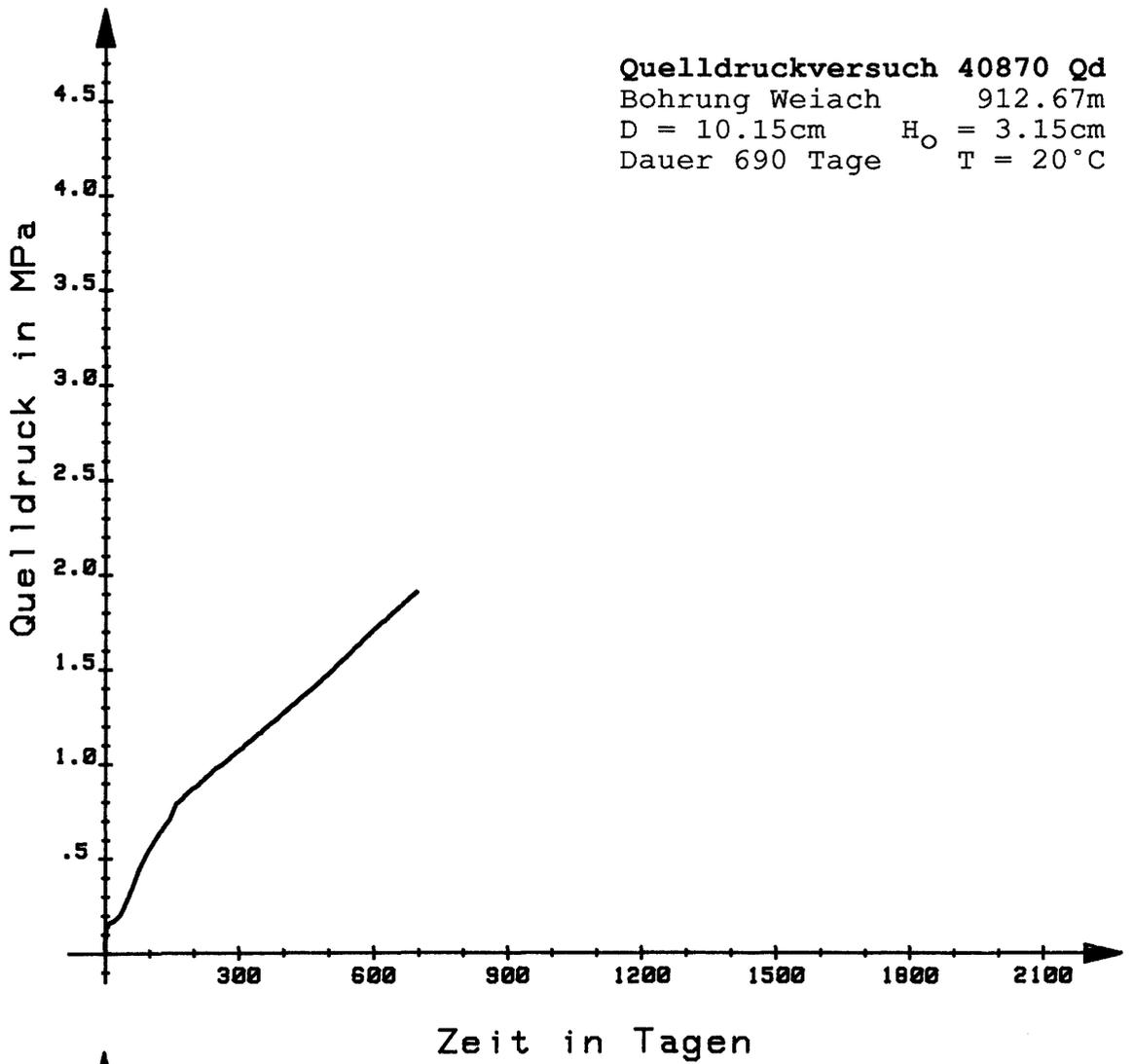


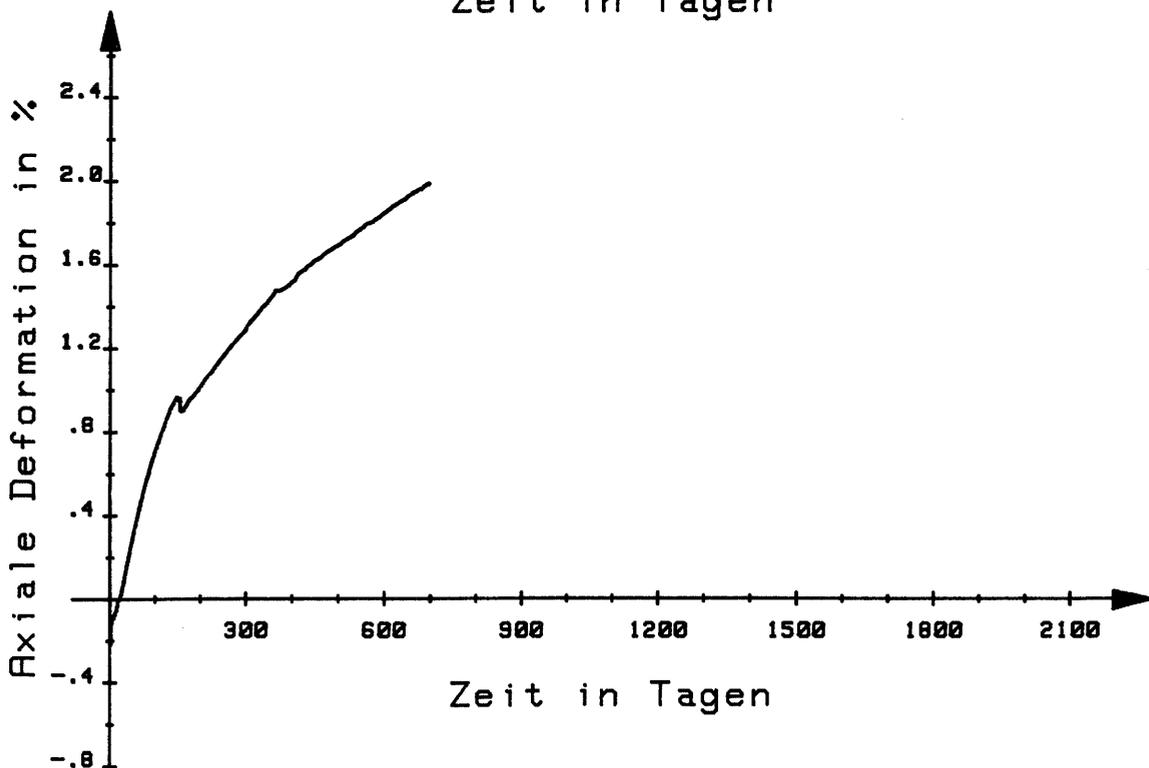
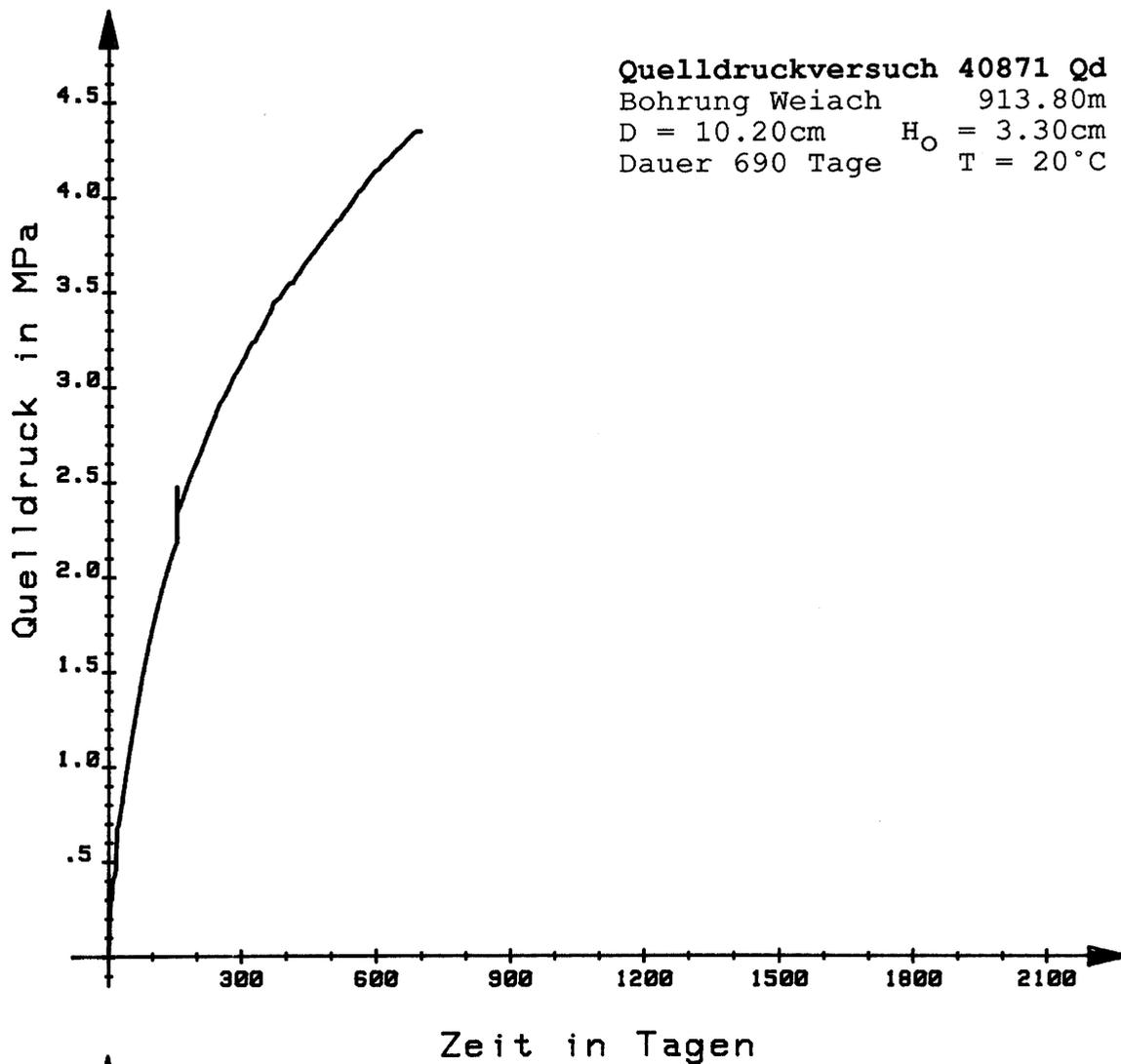


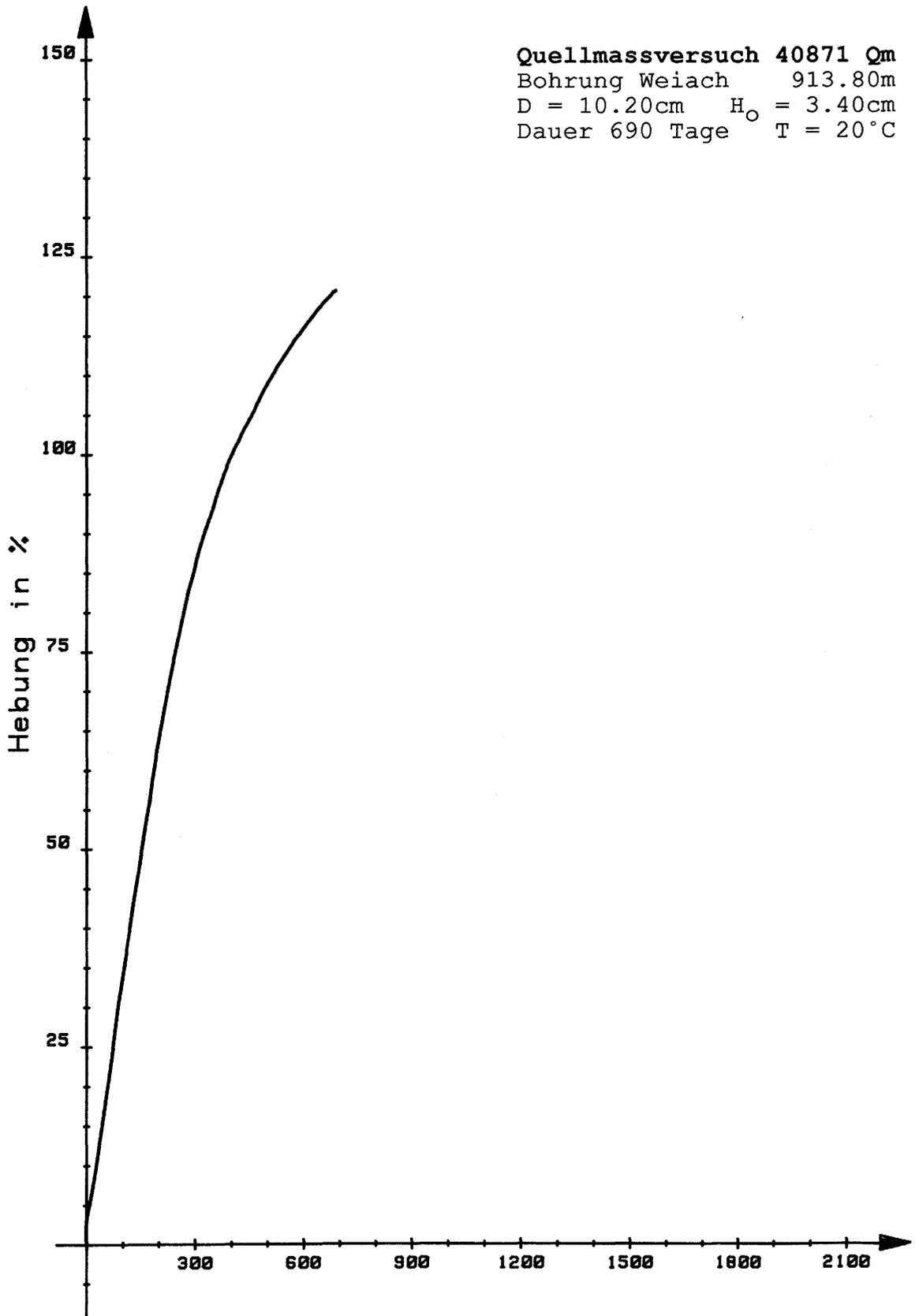


Quellmassversuch 40869 Qm
Bohrung Weiach 910.78m
D = 10.20cm H₀ = 3.20cm
Dauer 686 Tage T = 20°C









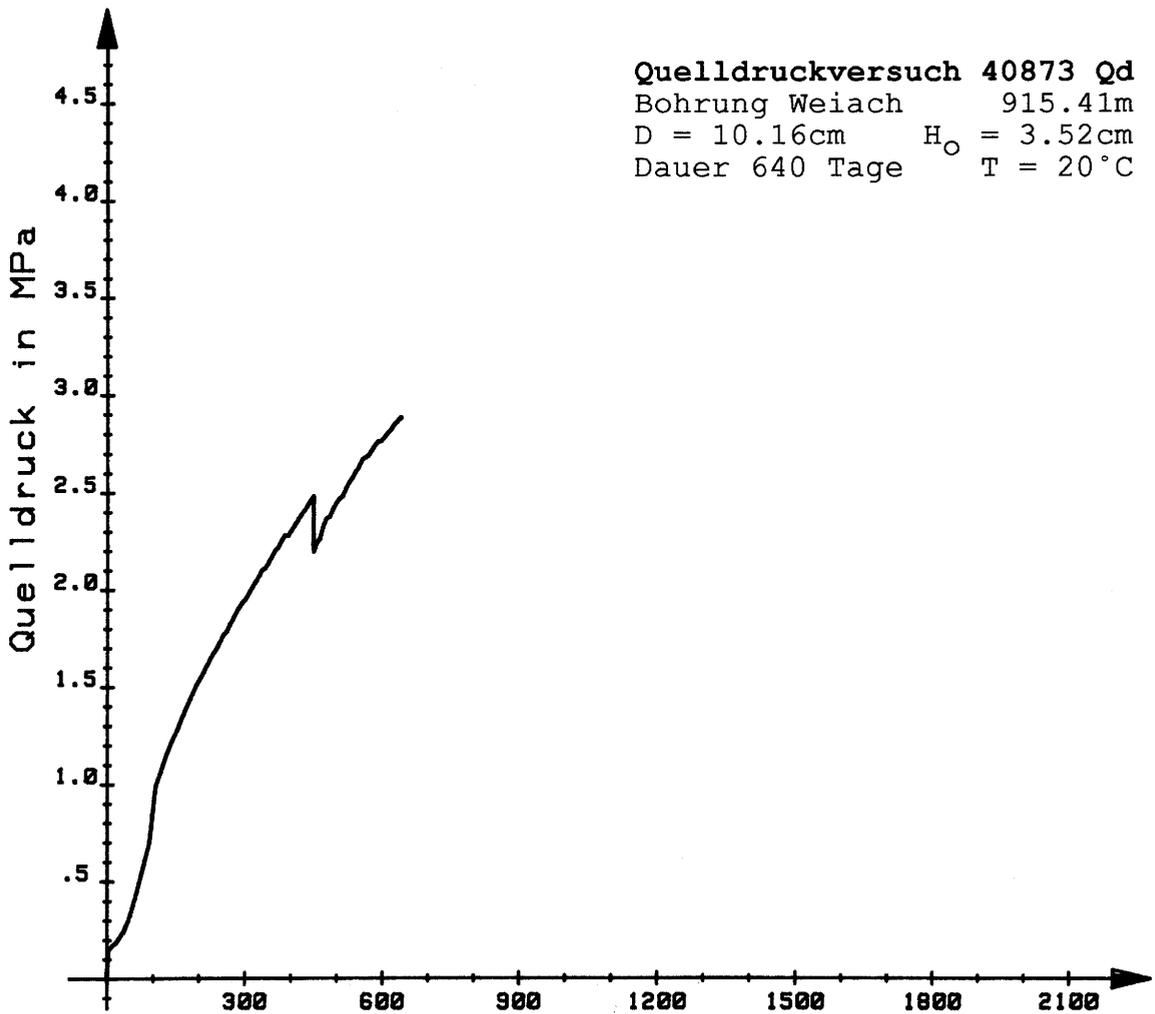
Zeit in Tagen

Quelldruckversuch 40873 Qd

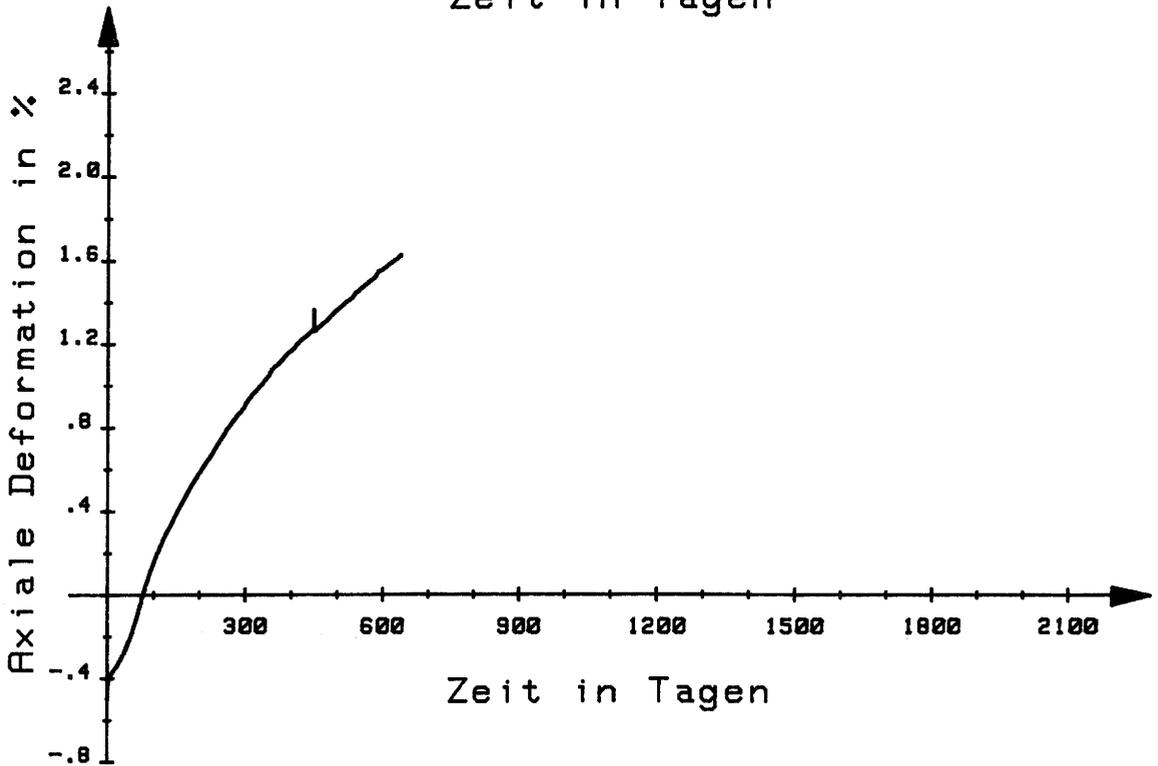
Bohrung Weiach 915.41m

D = 10.16cm $H_o = 3.52\text{cm}$

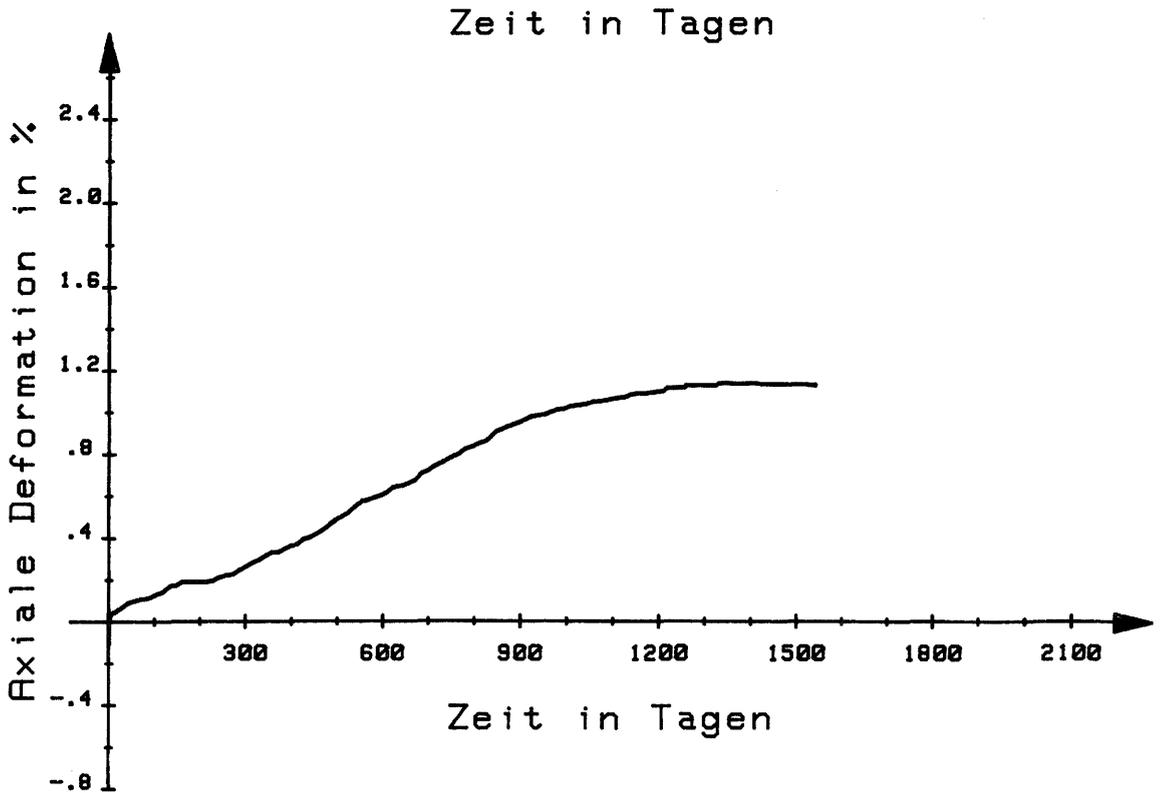
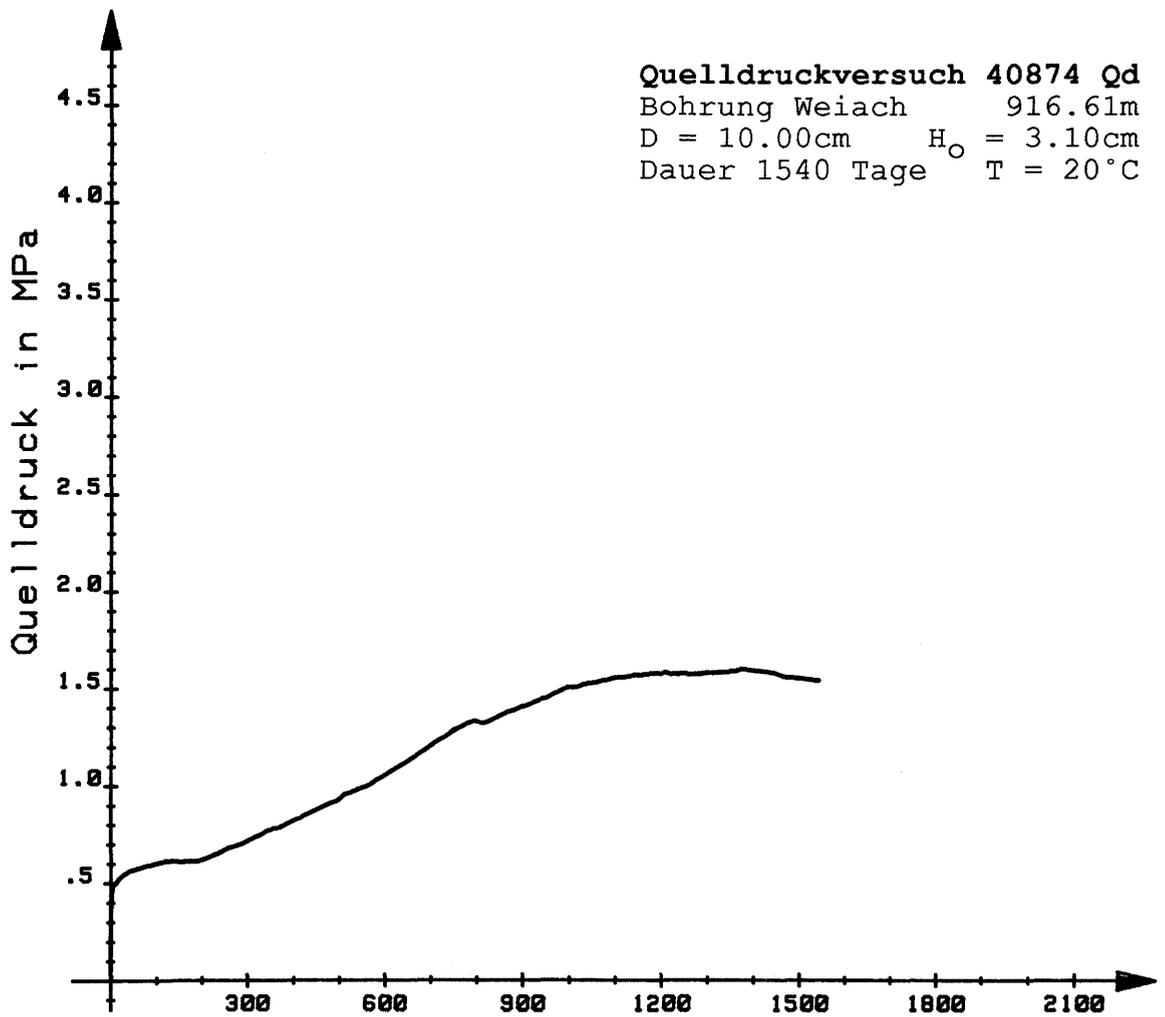
Dauer 640 Tage T = 20°C



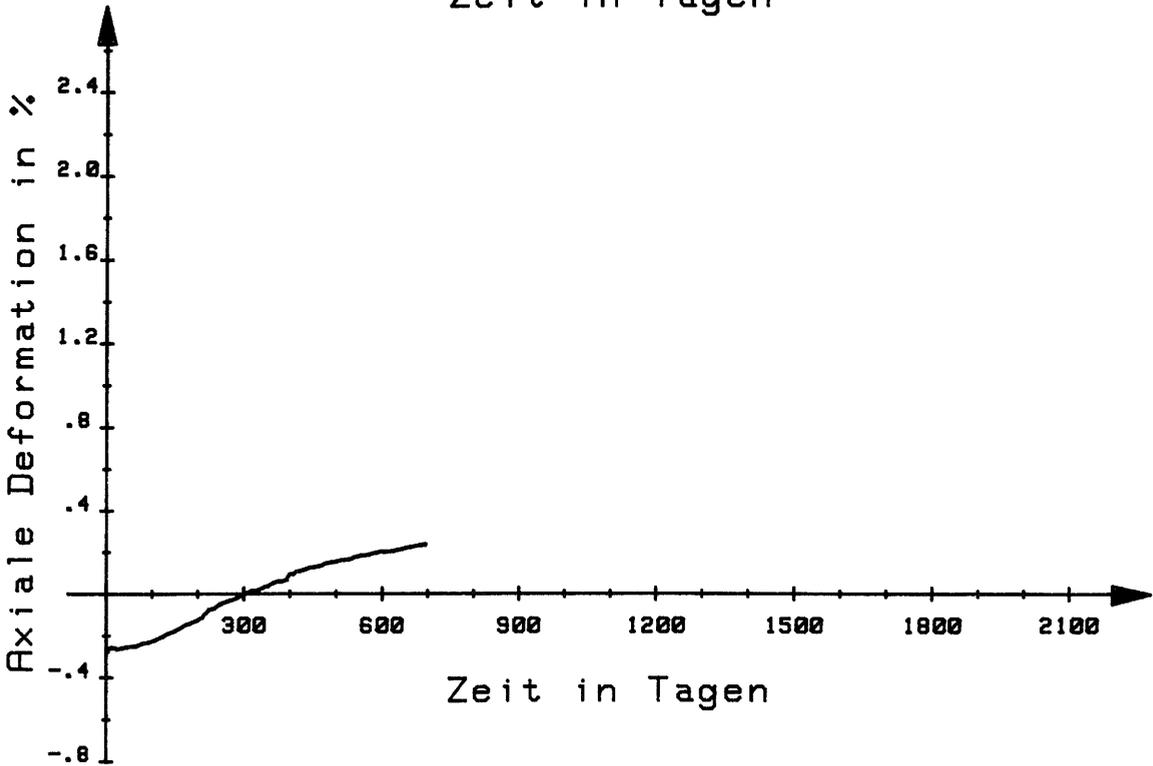
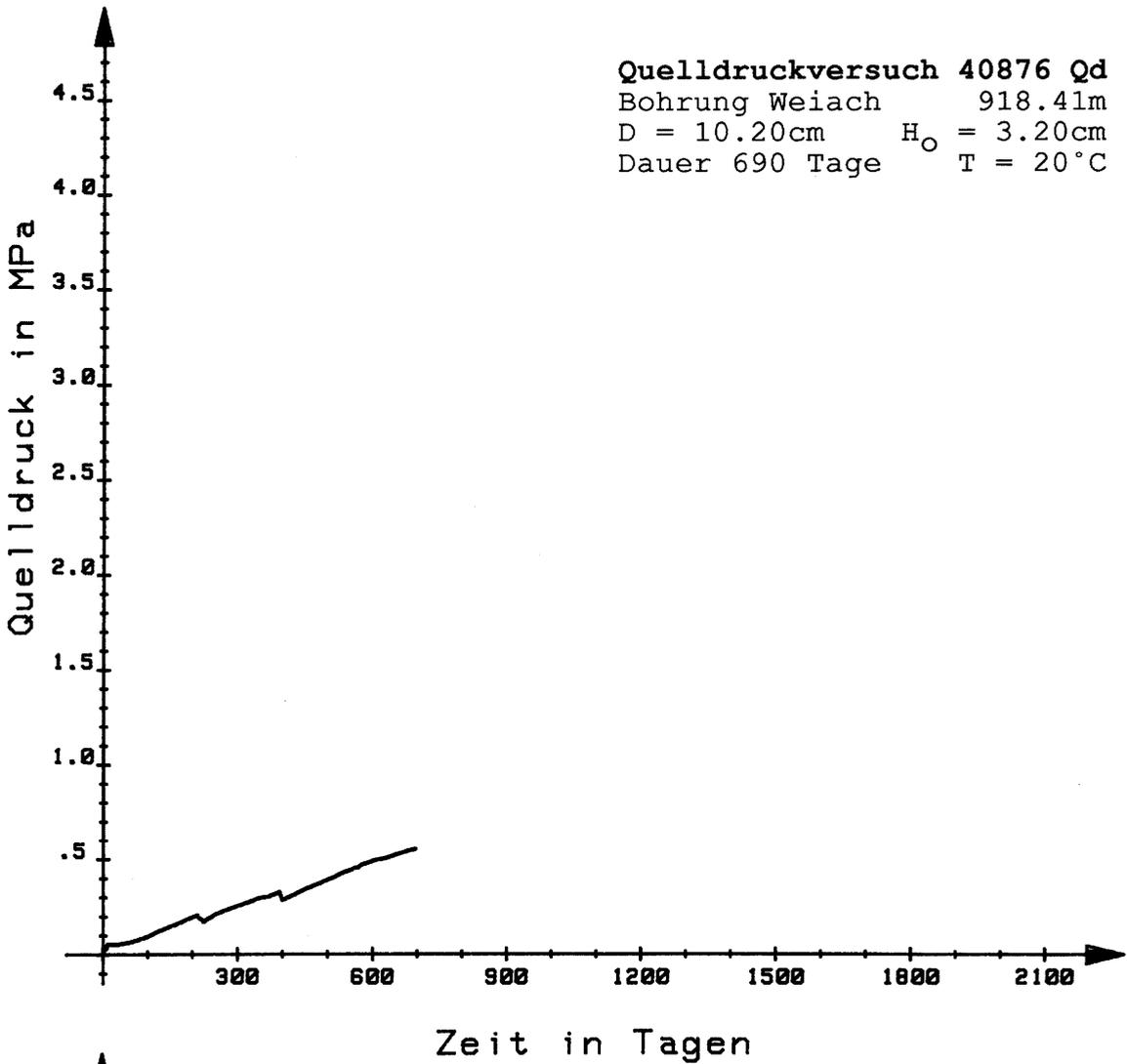
Zeit in Tagen

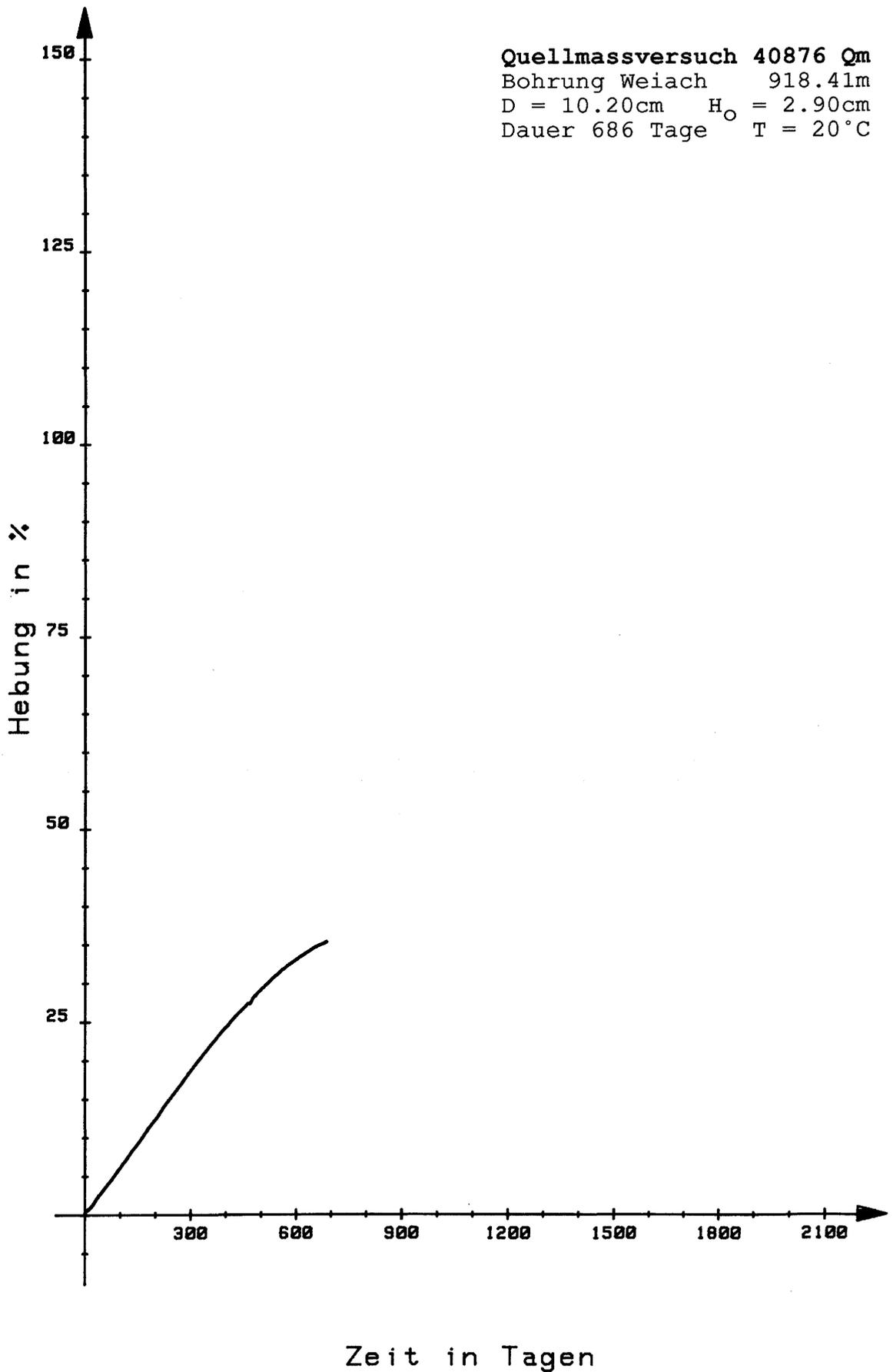


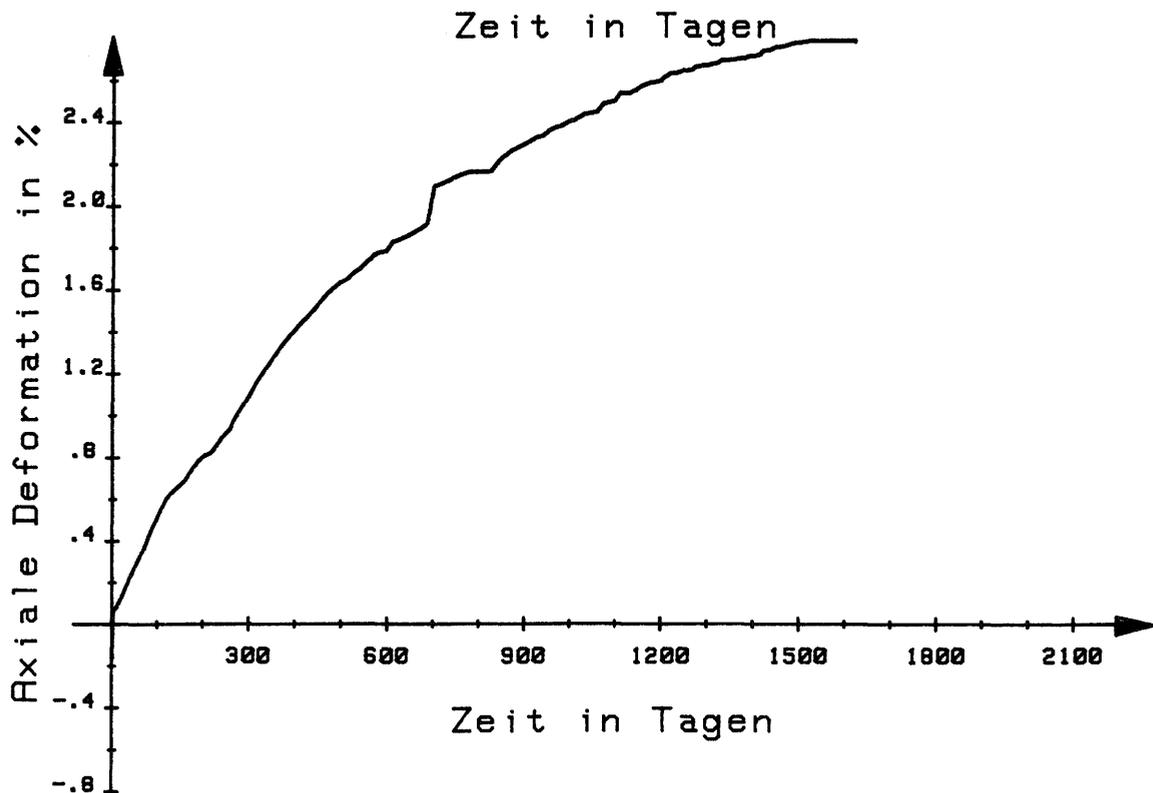
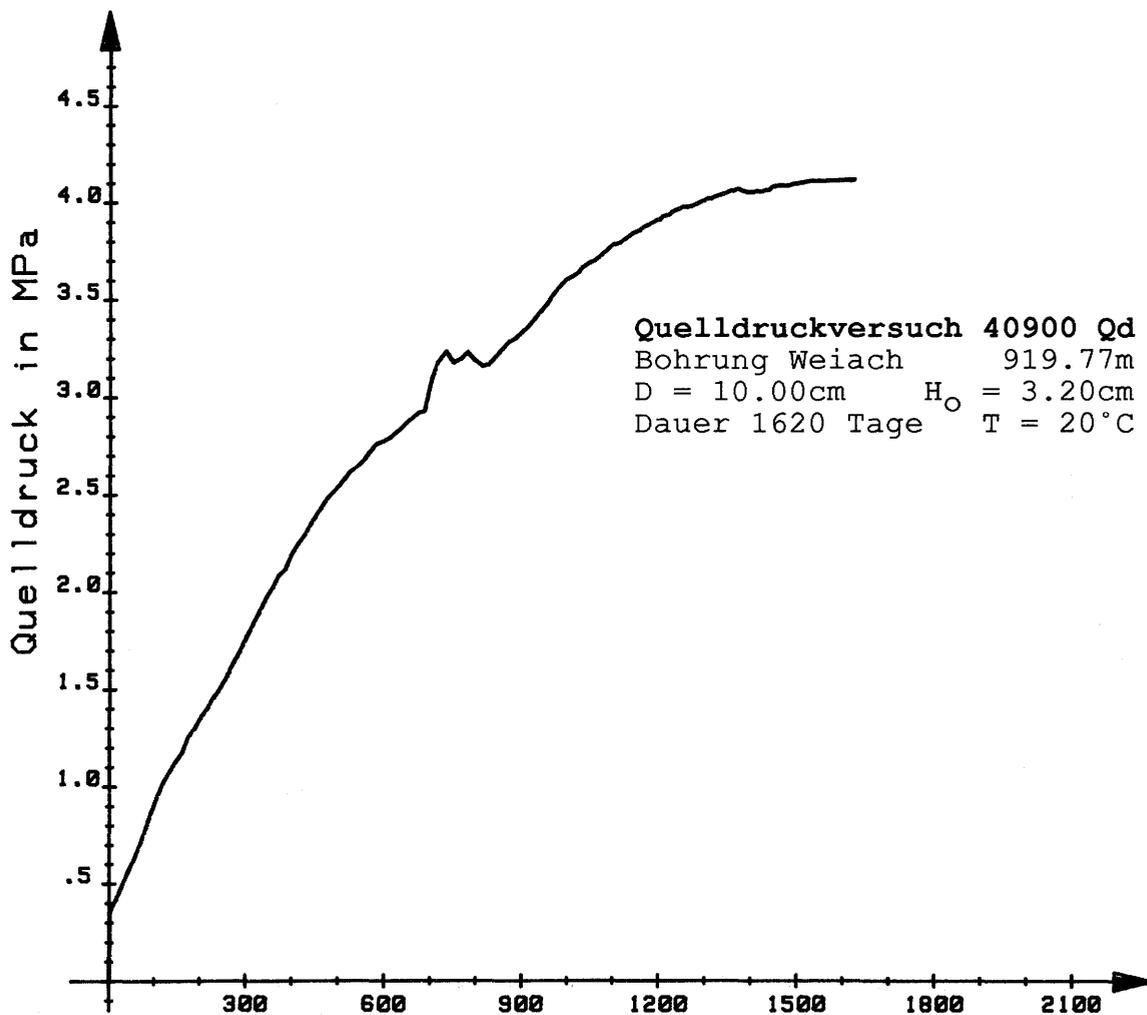
Zeit in Tagen

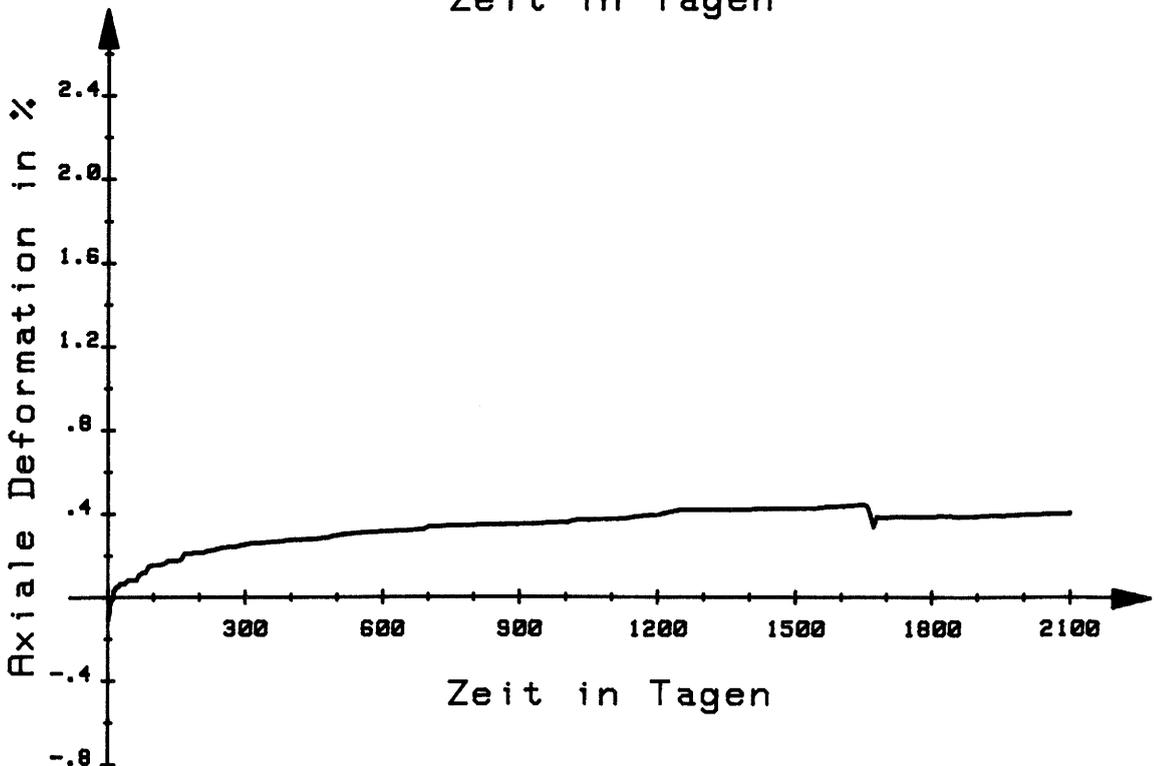
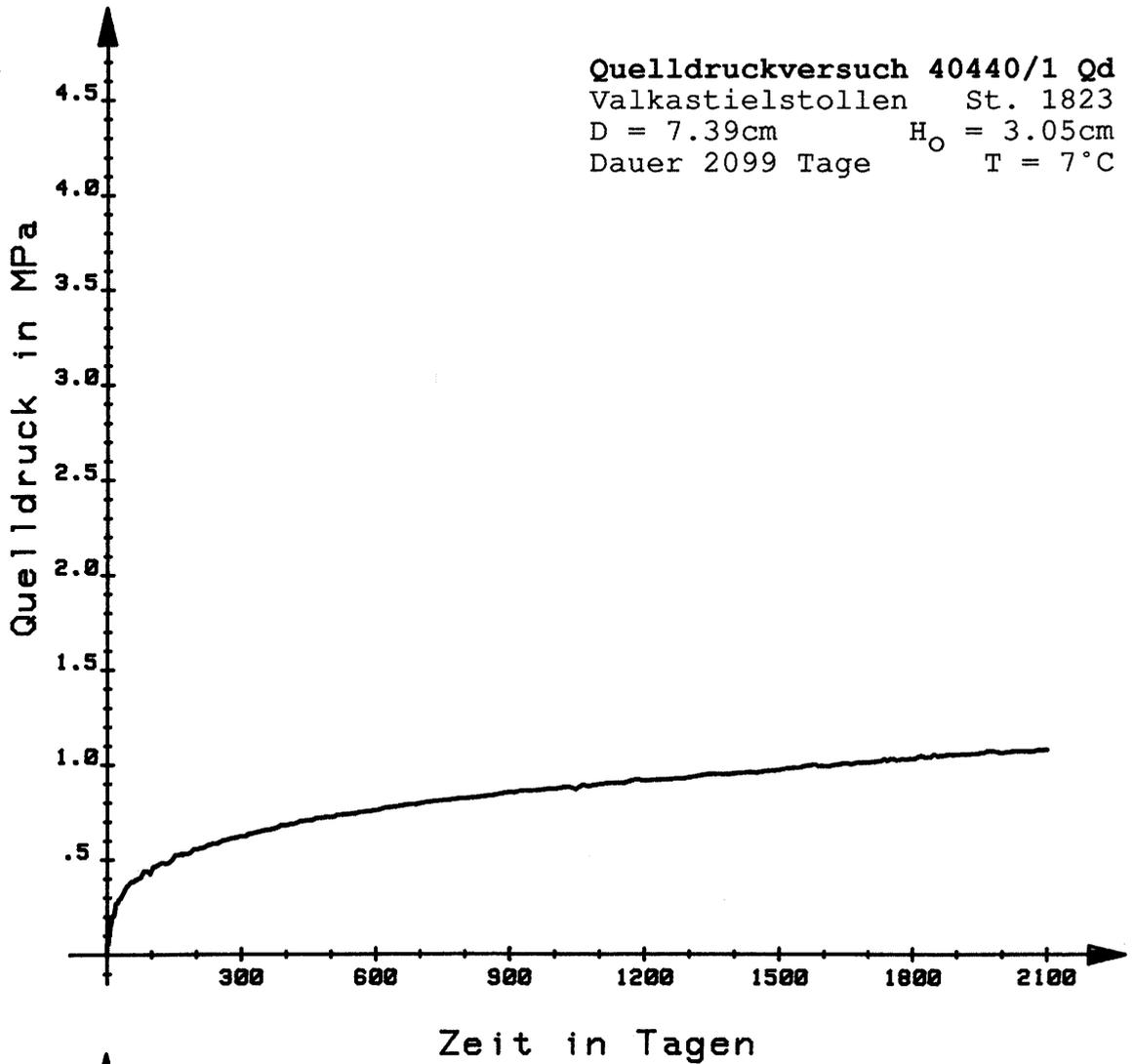


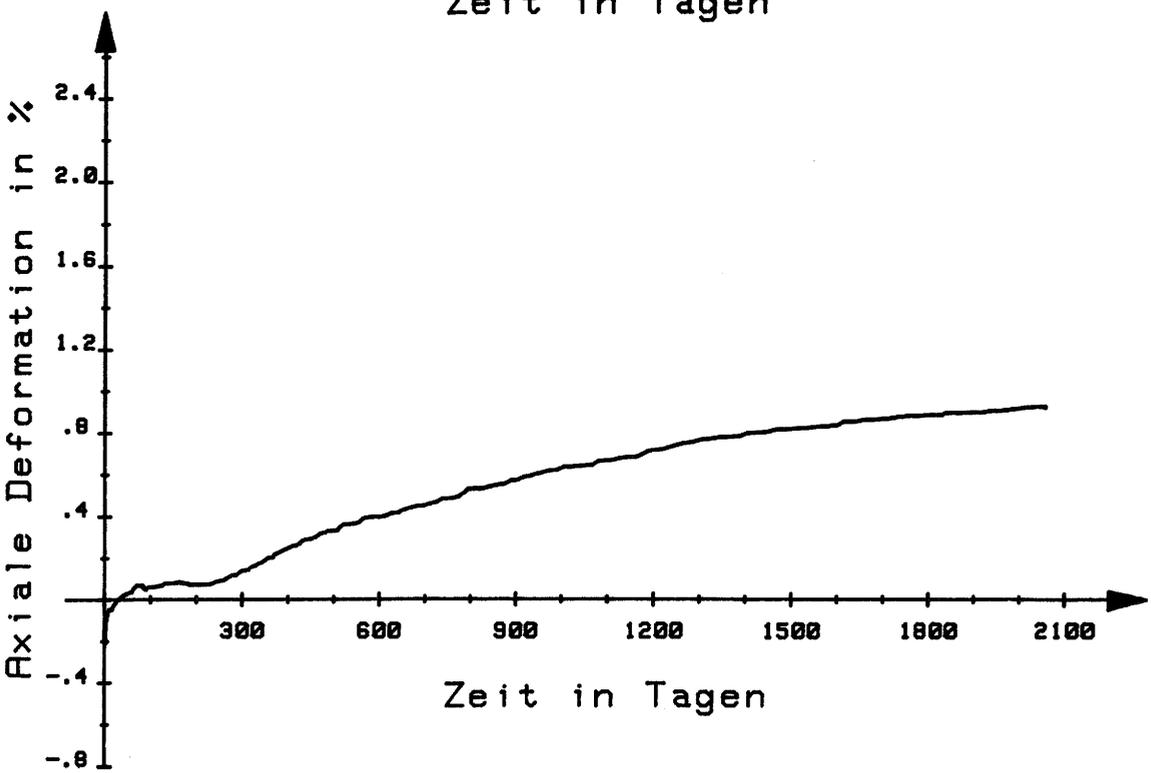
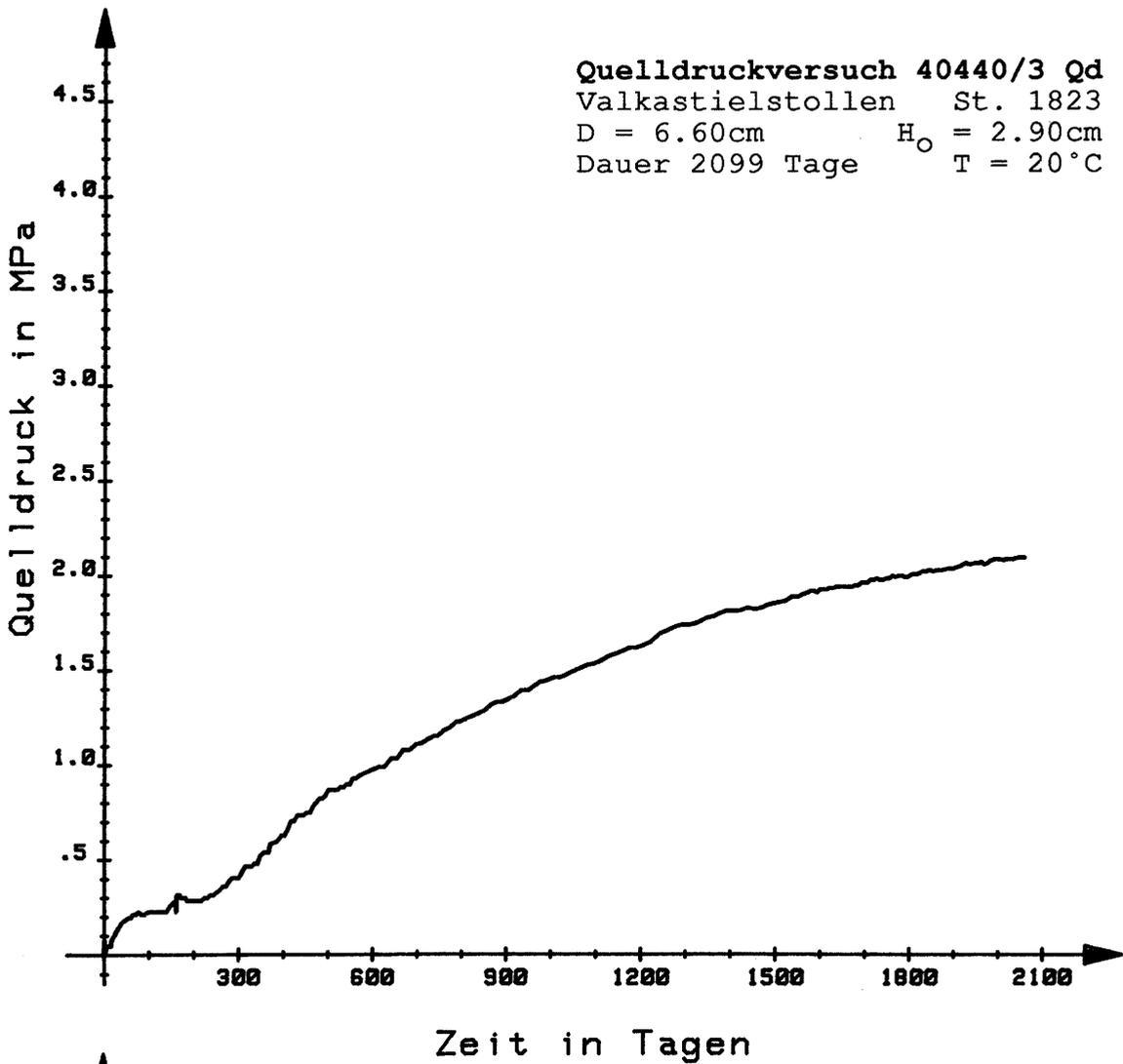
Quelldruckversuch 40876 Qd
Bohrung Weiach 918.41m
D = 10.20cm H₀ = 3.20cm
Dauer 690 Tage T = 20 °C



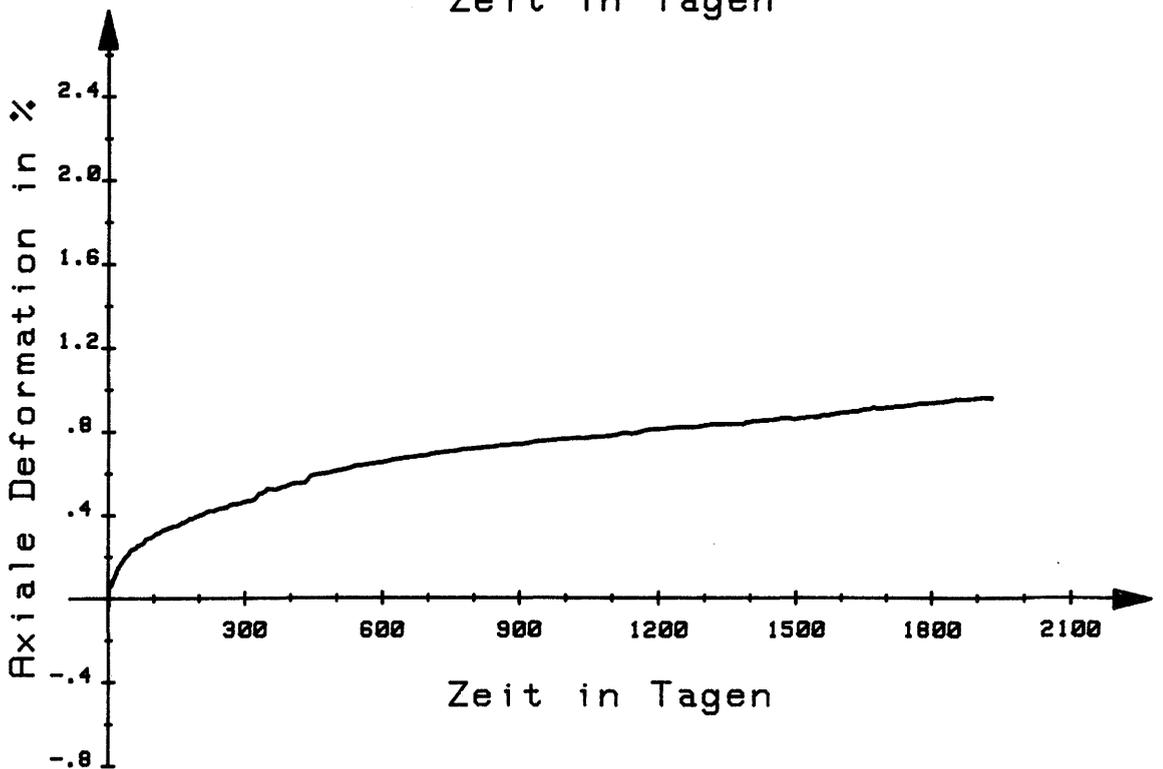
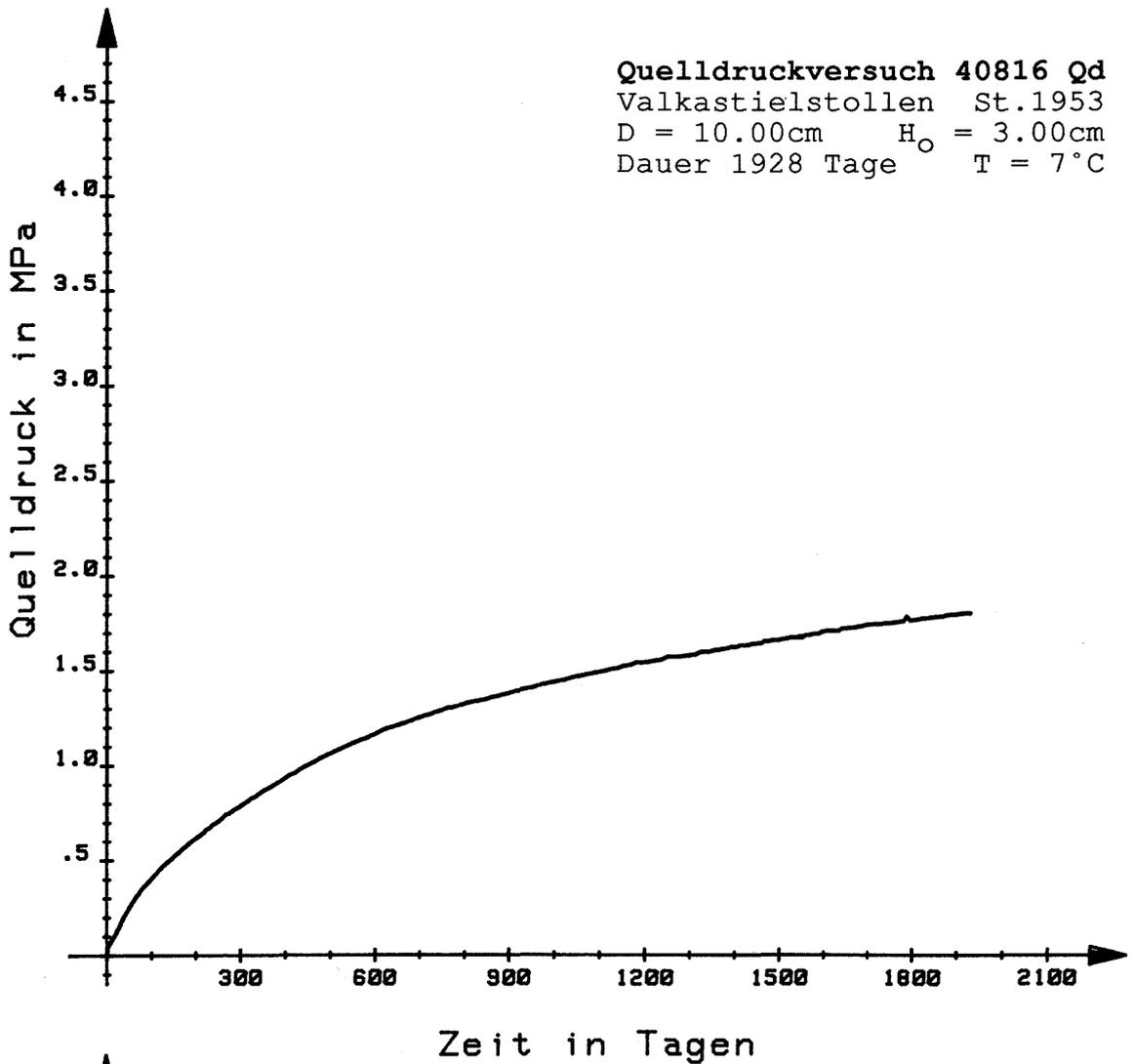




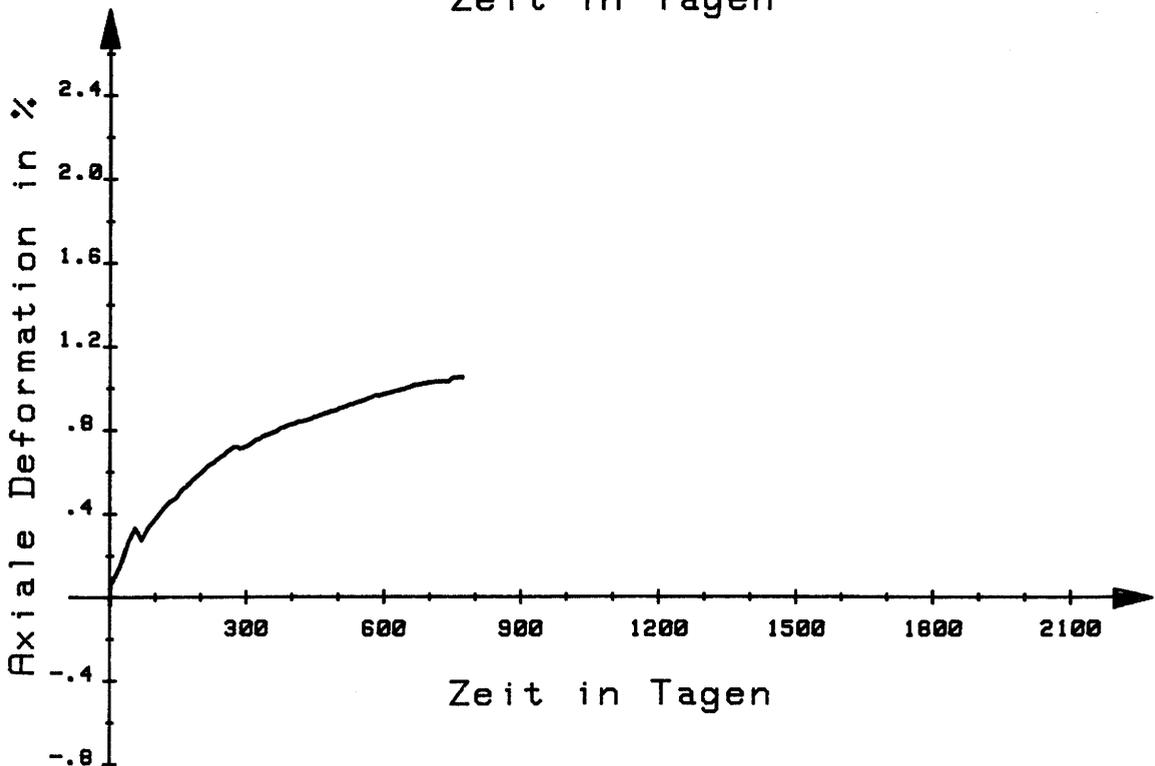
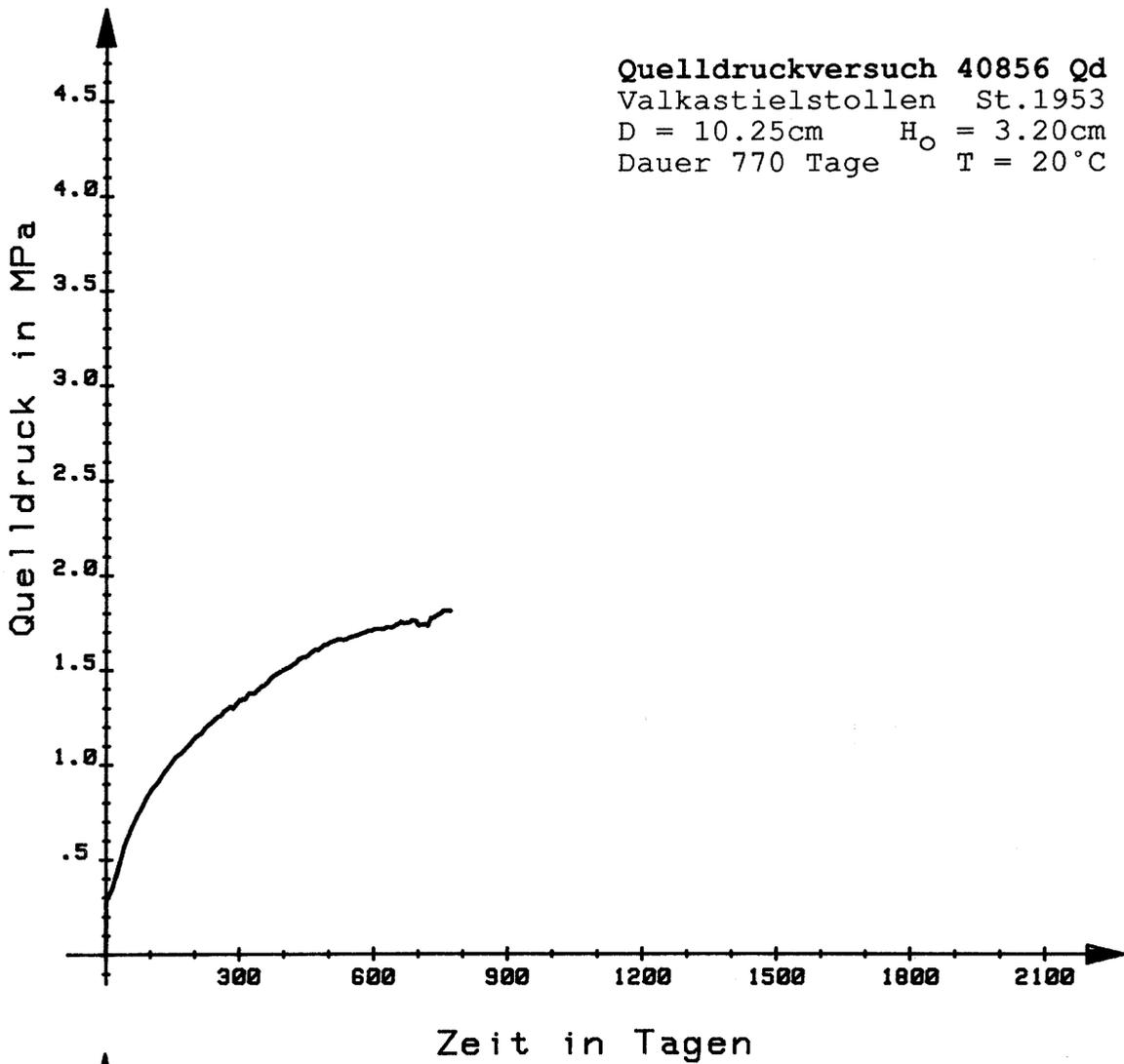




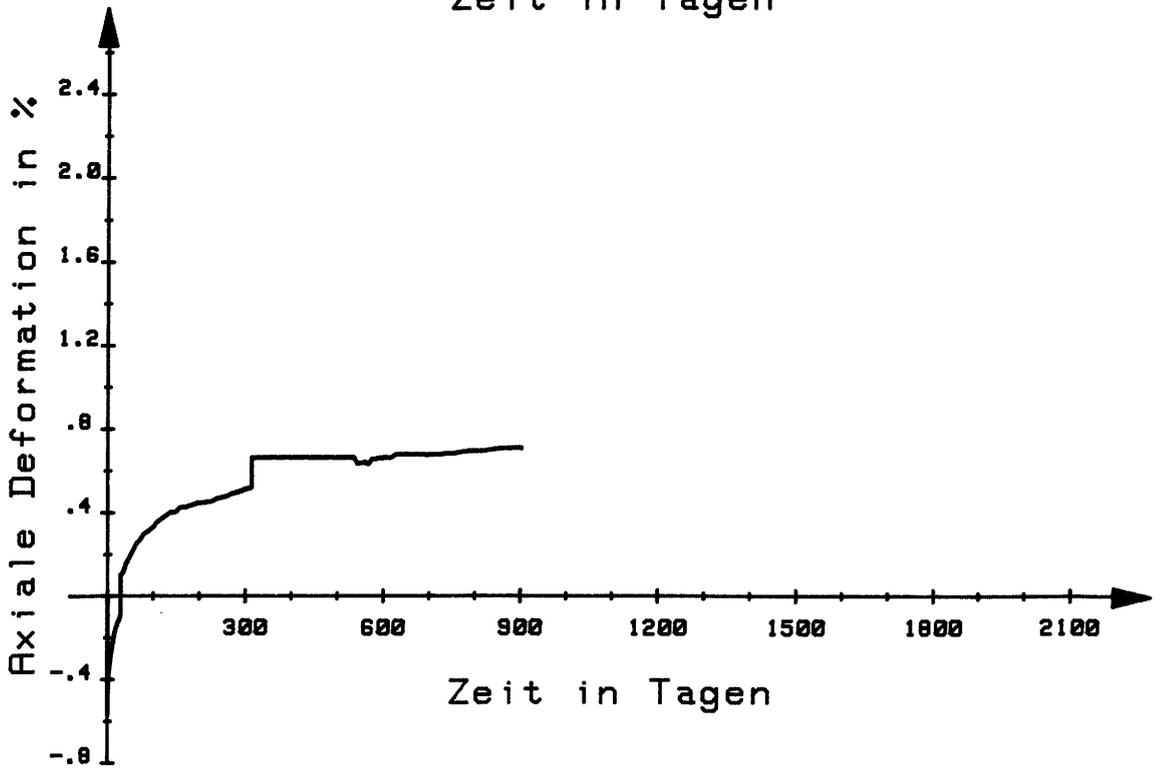
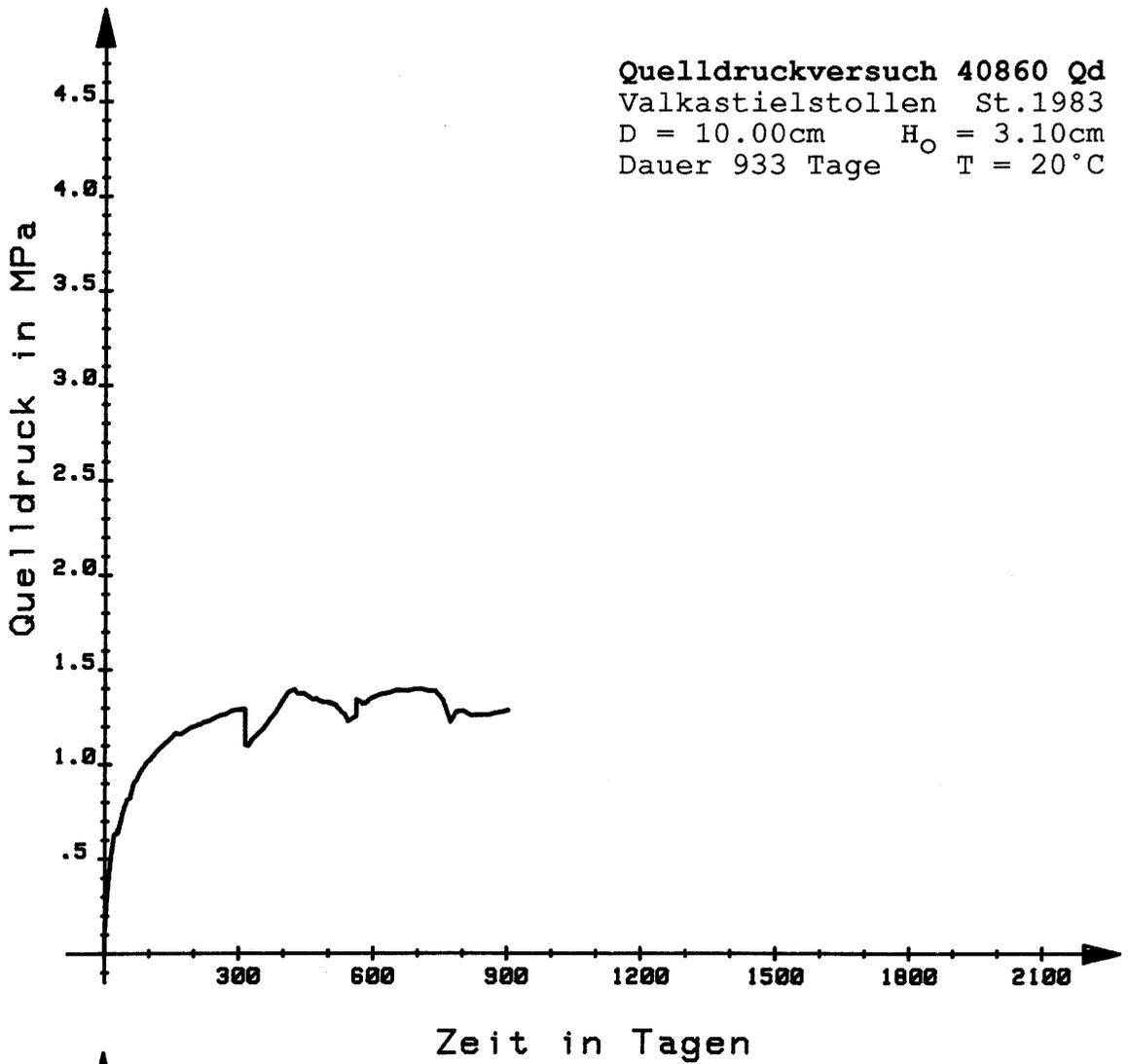
Quelldruckversuch 40816 Qd
 Valkastielstollen St.1953
 D = 10.00cm H₀ = 3.00cm
 Dauer 1928 Tage T = 7°C



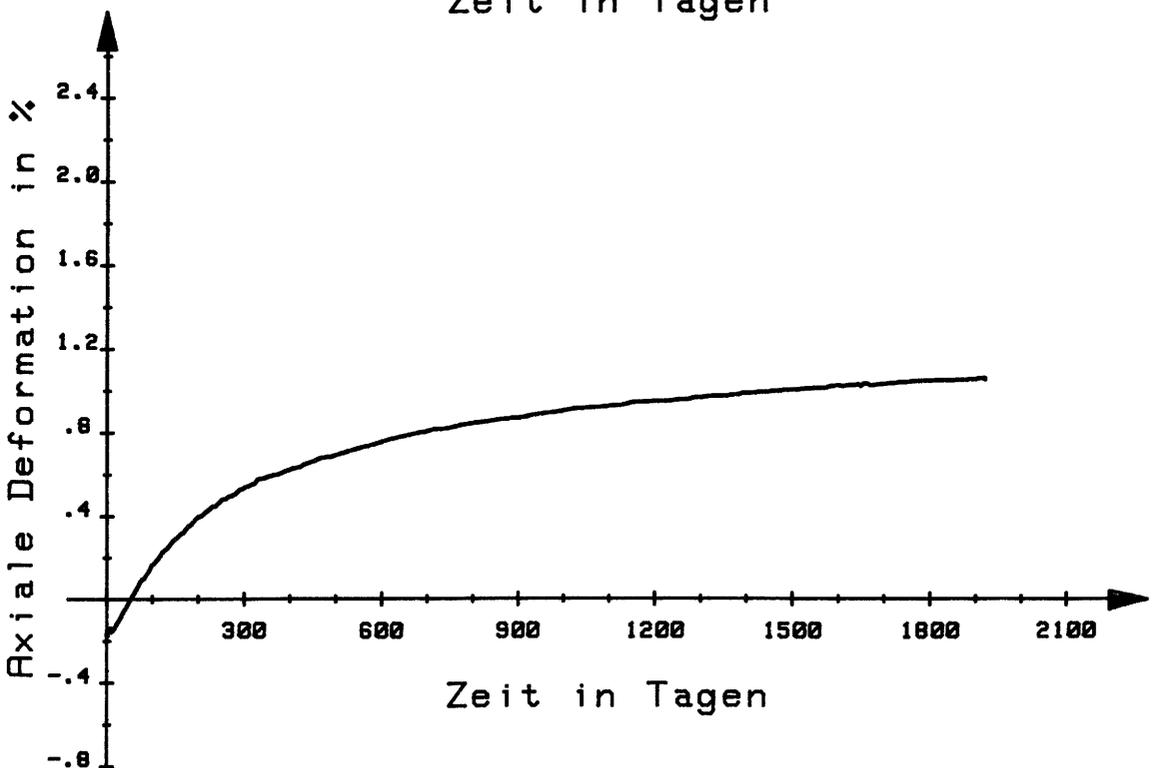
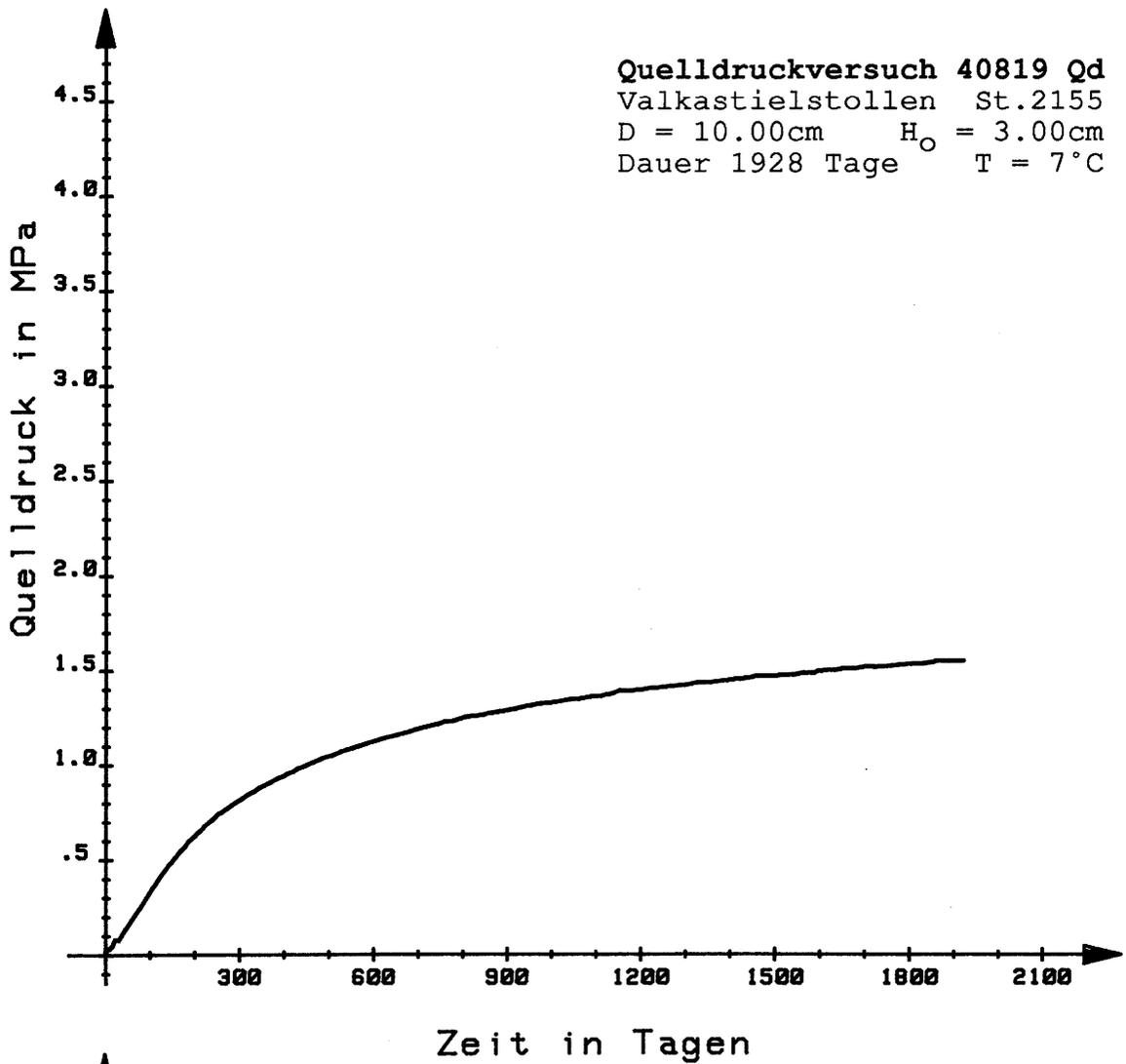
Quelldruckversuch 40856 Qd
Valkastielstollen St.1953
D = 10.25cm H₀ = 3.20cm
Dauer 770 Tage T = 20°C

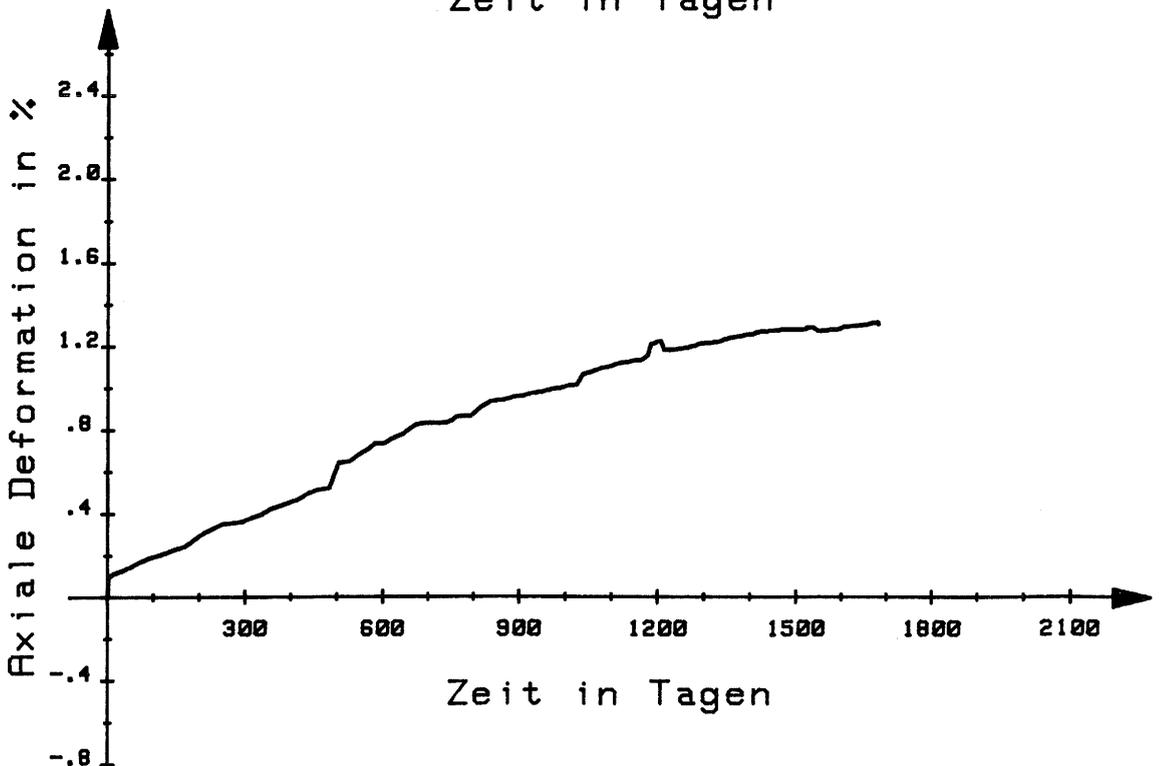
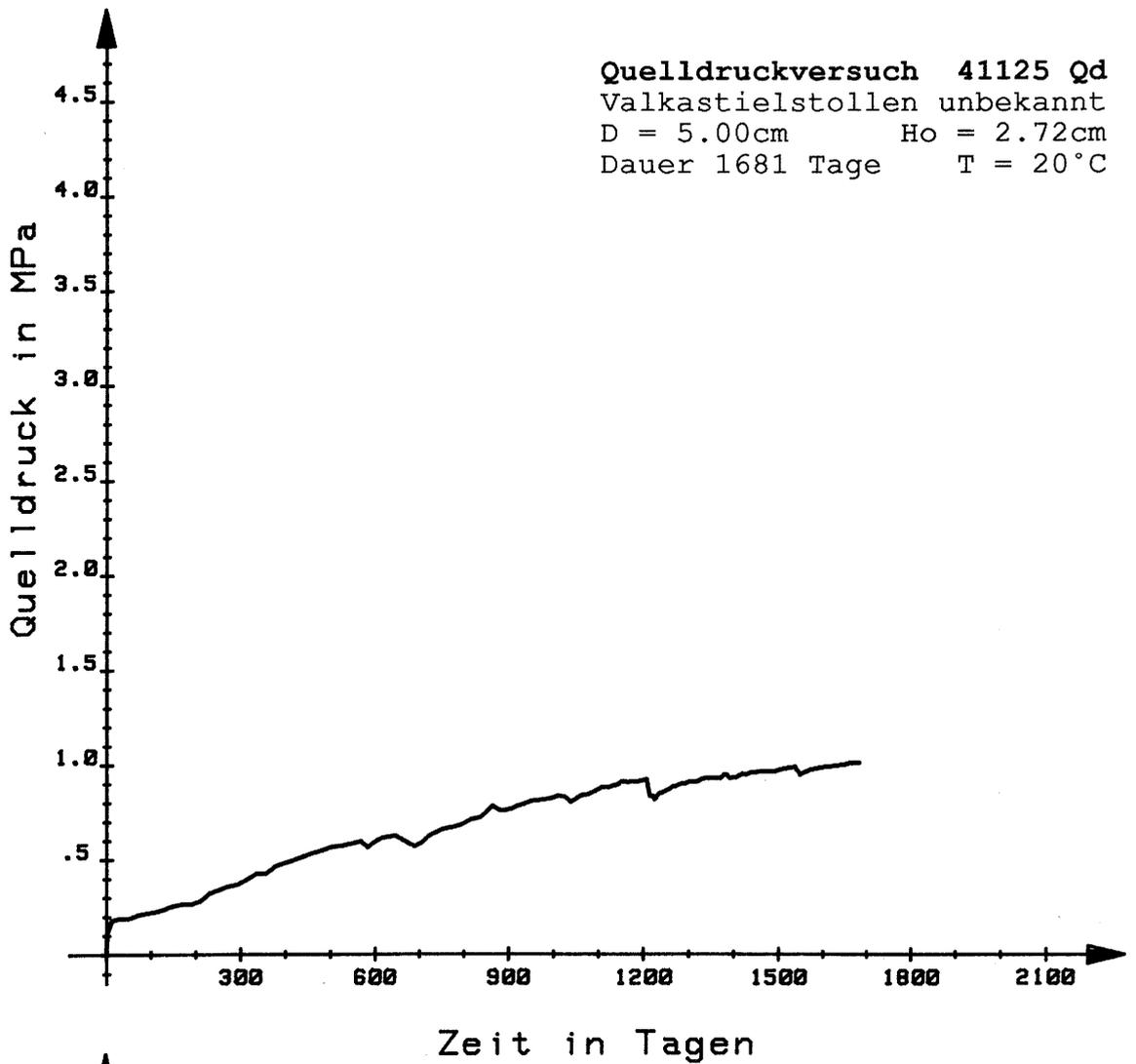


Quelldruckversuch 40860 Qd
 Valkastielstollen St.1983
 D = 10.00cm $H_0 = 3.10\text{cm}$
 Dauer 933 Tage T = 20°C

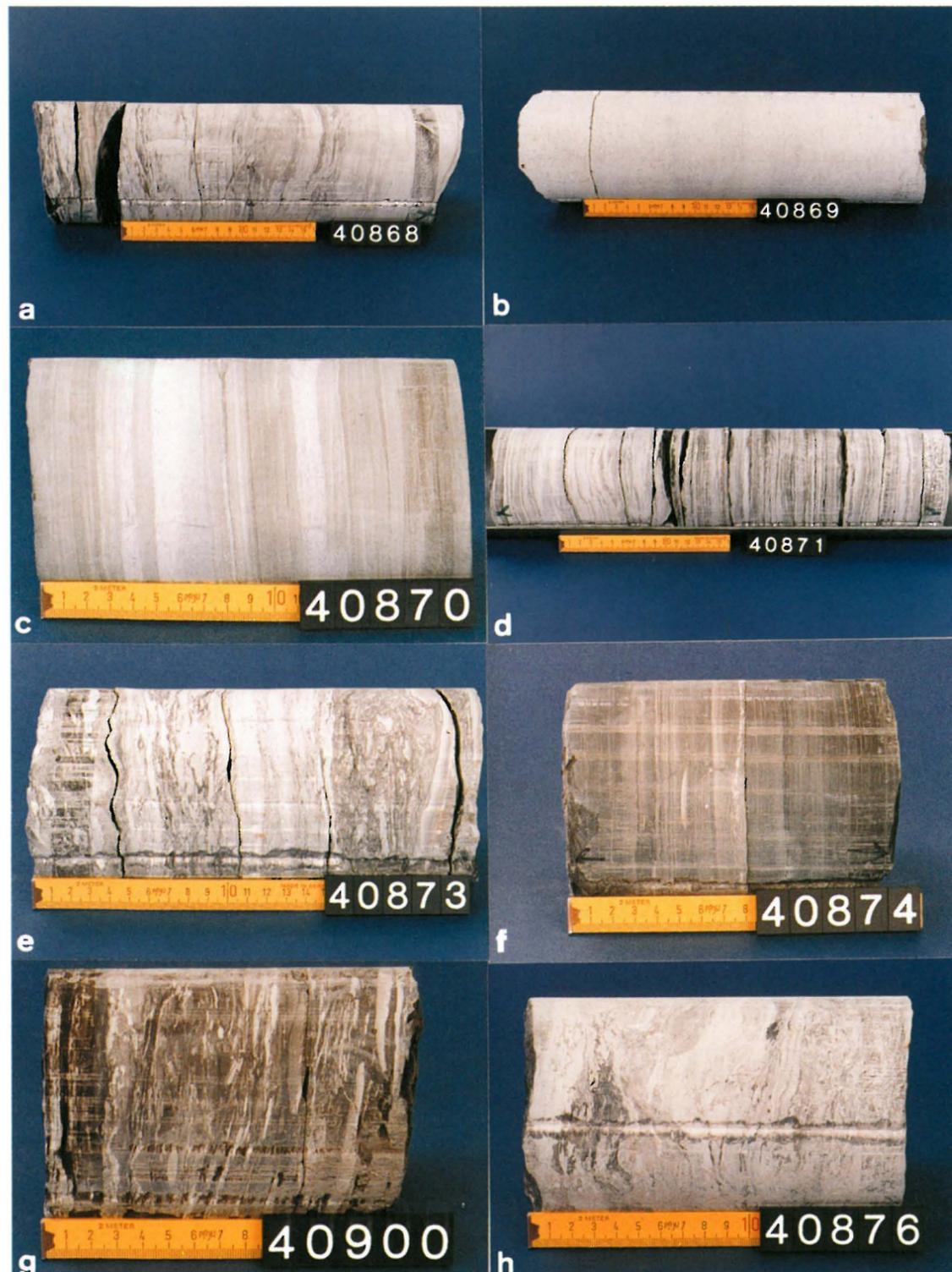


Quelldruckversuch 40819 Qd
Valkastielstollen St.2155
D = 10.00cm H₀ = 3.00cm
Dauer 1928 Tage T = 7°C

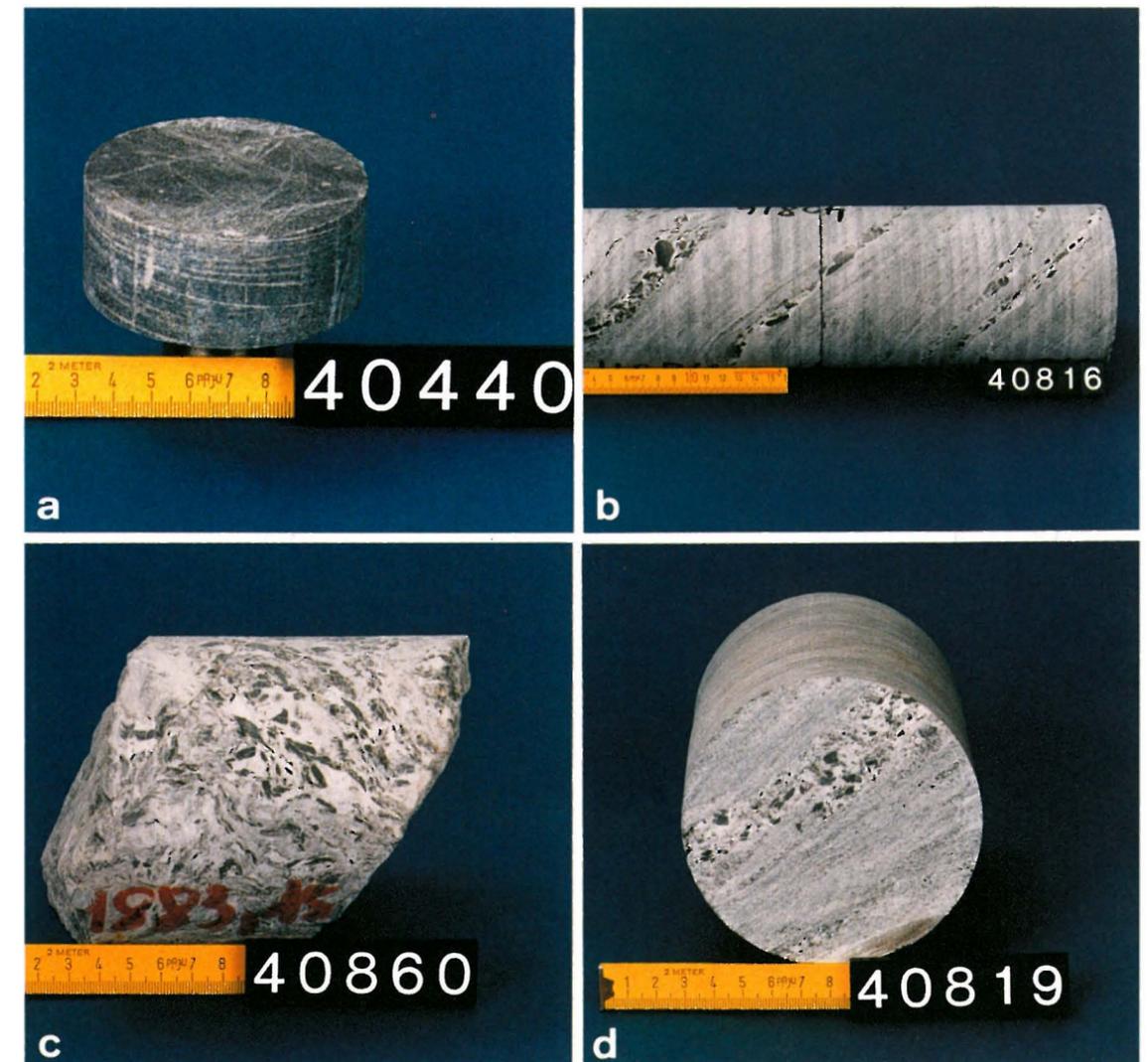




Fototafel 1:



Fototafel 2:



Fototafel 1: a-h) Ausgewähltes Probenmaterial von Weiach für Quellversuche mit hellen Sulfat- und dunklen Mergellagen.

Fototafel 2: a-d) Ausgewähltes Probenmaterial vom Raibler Gips (Oberostalpin) aus dem Valkastielstollen (Walgauwerk) für Quellversuche mit hellgrauem Sulfat und dunkelgrauen, zerrissenen Tonklasten.

NAGRA

TECHNISCHER BERICHT NTB 90-17

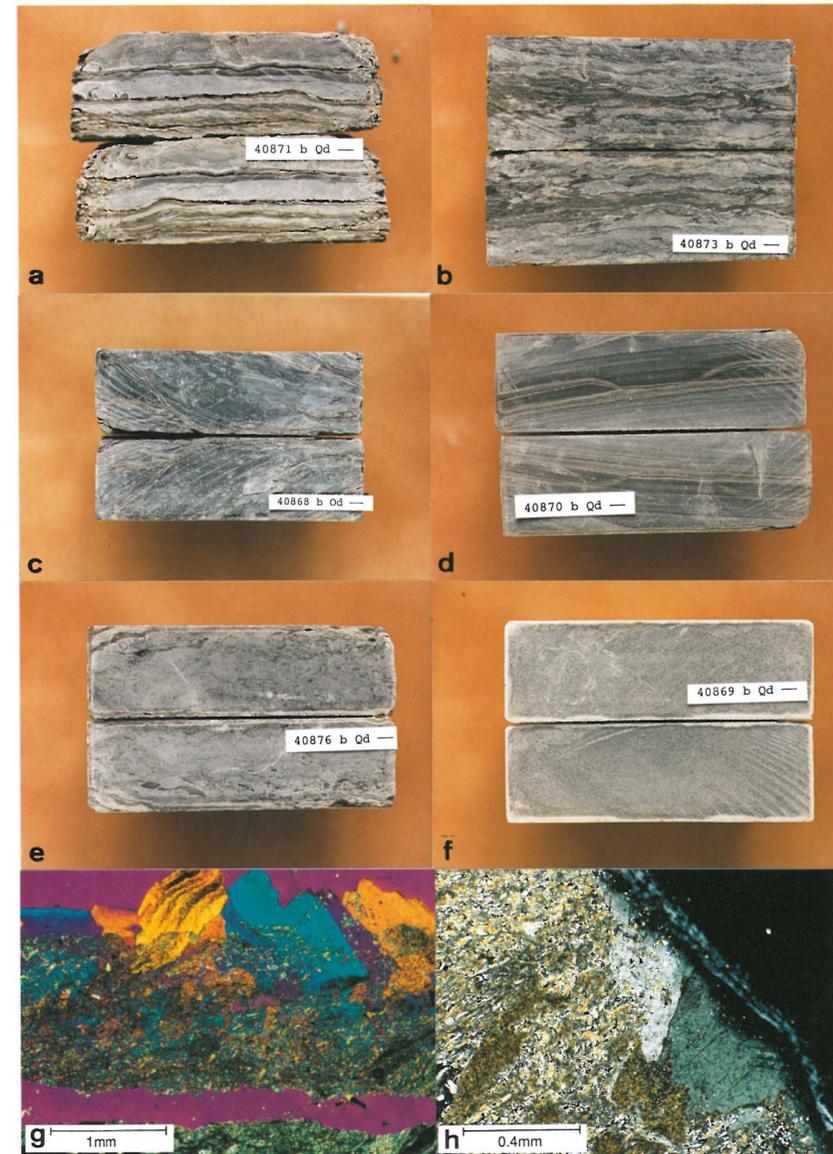
AUSGEWÄHLTES PROBENMATERIAL FÜR QUELLVERSUCHE

Sondierbohrung Weiach und Valkastielstollen

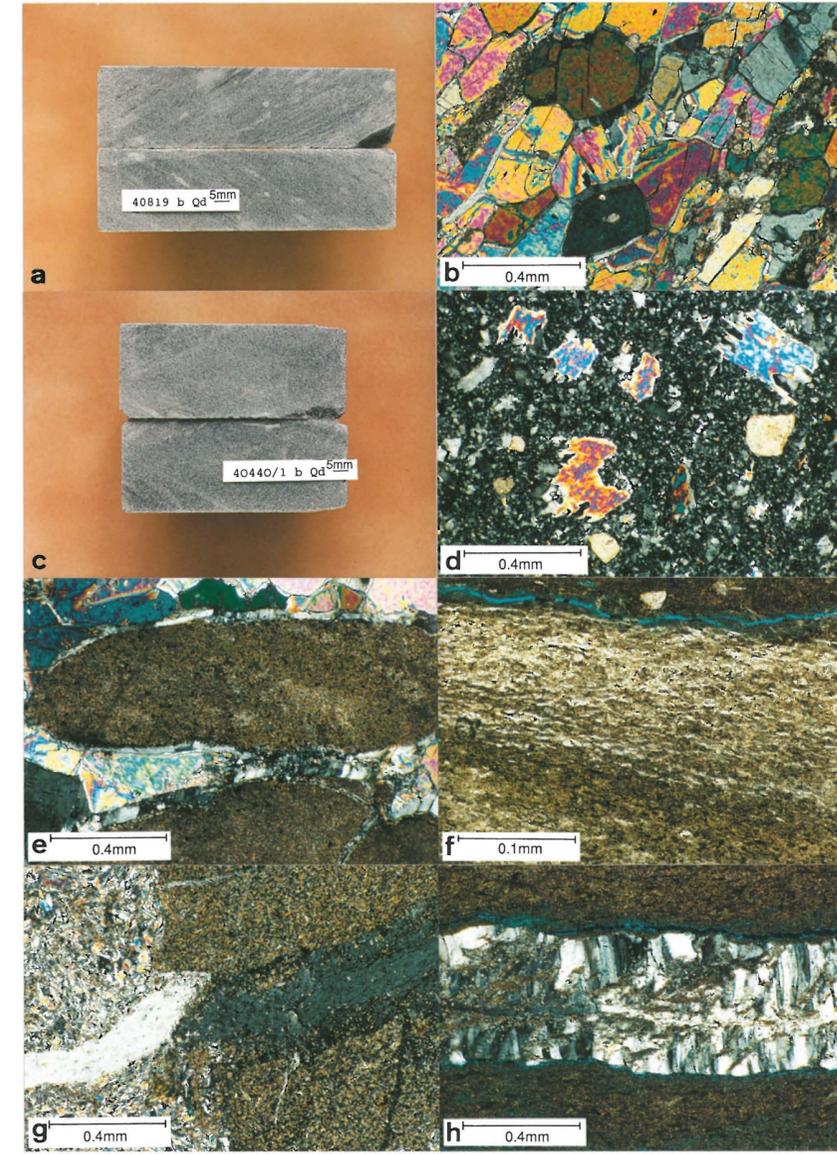
DAT.: Juni 1990

BEILAGE 1

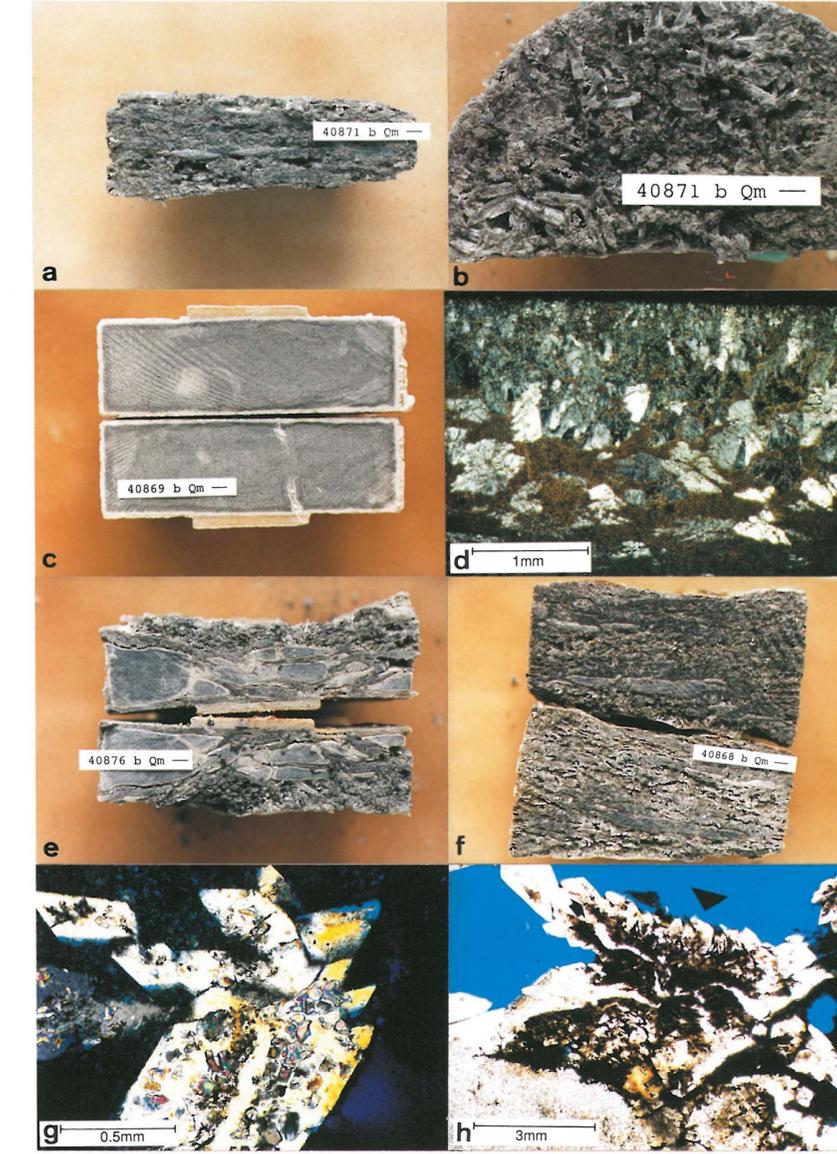
Fototafel 3:



Fototafel 4:



Fototafel 5:



Fototafel 3: Ausgewählte Proben von Quelldruckversuchen (Massstab auf Foto = 5 mm) mit folgenden Quelldrücken beim Ausbau: a) 4.4 N/mm², b) 2.9 N/mm², c) 2.3 N/mm², d) 1.9 N/mm², e) 0.6 N/mm², f) 0.03 N/mm², g) und h) Dünnschliff-Aufnahmen der Probe 40876b Qd mit dem Gipssaum (<3 mm), welcher die Probe umgibt (vgl. Foto e).

Fototafel 4: Probenmaterial und Dünnschliff-Aufnahmen von ausgewählten Quelldruckproben. a) Probe mit feinlagigem Anhydrit (vgl. auch b), b) dieselbe Probe 40819b Qd mit Gips (grau) in Bruch- und Spaltflächen von Anhydrit, c) massiger Anhydrit, d) daraus die vor dem Versuch gemahlene und gesinterte Probe 40440/3b Qd, jetzt mit Anhydritrelikten in der Gipsmatrix, e) Probe 40816b Qd mit randlich vergipsten Tonklasten, f) Probe 40876b Qd: diffuse Vergipsung (hell) von feinen Klüften in tonigem Dolomit (dunkel), g) Probe 40876b Qd Gipsvene mit homogen ausgebildetem Gips, h) Probe 40876b Qd: Fasergips in Tonklast.

Fototafel 5: Ausgewählte Proben von Quellmass-Versuchen, a und b) poröse Struktur durch Gipskristalle (bis 1 cm) in Mergellagen entstanden, c) äussere Vergipsung der Probe durch Gipskristalle (bis 6 mm, vgl. d), d) Dünnschliff der vorangehenden Probe 40869b Qm: feinkörniger Gips am Rand der Probe, grosse idiomorphe Kristalle gegen innen, e) randliche Vergipsung der Anhydritklasten in dem mit Gips durchsetztem Mergel, f) Probe mit 82 % Quellhebung mit folgenden zwei Dünnschliffen, g) im Gipskristall (weiss bis gelblich) sind reliktsch Ton und Anhydrit eingeschlossen und, h) aus tonigen Lagen (dunkelbraun) wachsen Gipskristalle (weiss). Der Porenraum ist blau gefärbt.