

**DECKBLATT**

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
				AA	NNNN	NN
EU 476	9K	331921	GHS	BV	000 3	00

**Titel der Unterlage:**  
 Stellungnahme zur EU 438, Rev. 00  
 "Nachweis der Machbarkeit der Schachtverfüllung"

**Seite:**  
I.

**Stand:**  
28.06.93

**Ersteller:**  


**Textnummer:**

**Stempelfeld:**

PSP-Element TP.../...:

zu Plan-Kapitel: 4.2



30/06/93

Freigabe für Behörden

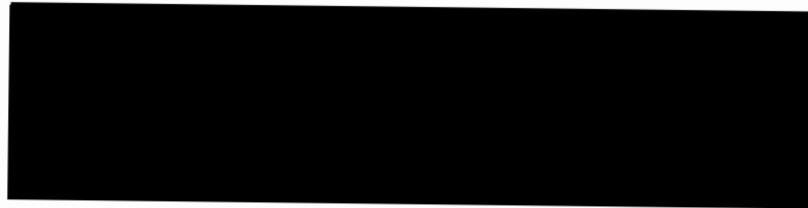


30/06/93

Freigabe im Projekt

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS.





[Redacted]  
[Redacted]

An das  
Bundesamt für Strahlenschutz



Ihr Zeichen und Tag:

Unser Zeichen:



Durchwahl:

Datum:

28.06.93

Betr:

Planfeststellungsverfahren Konrad, Langzeitsicherheit.  
Fachgespräch am 26.05.1993 beim Niedersächsischen Umwelt-  
ministerium

Sehr geehrte Damen und Herren,

anlässlich des o.g. Fachgespräches wurden zur EU 438 "Nachweis der  
Machbarkeit der Schachtverfüllung" vom [Redacted]  
[Redacted] eine Reihe von Fragen an das BfS gestellt, die  
ich als Gutachter des BfS zunächst mündlich beantwortet habe. Wie  
bei diesem Fachgespräch vereinbart, möchte ich nachfolgend diese  
Fragen schriftlich beantworten:



(1) Zu den Kapiteln 3.3 und 6 (Mineralische Abdichtung-Variante B, Ringraum mit Bentonitformsteinen):

(1.1) Bei welchen Projekten wurden die beschriebenen Bentonitformsteine bereits eingesetzt? Sind Einzelheiten hierzu bekannt (Steingröße, Anordnung, Bewässerung usw.)?

Im Rahmen des Stripa-Projekts wurden in den 80iger Jahren Untersuchungen zum Verhalten von Materialien durchgeführt, die im Rahmen von Verfüll- und Versiegelungsmaßnahmen von Endlagern eingesetzt werden sollen. Dabei wurden in den Jahren 1985 und 1986 u.a. auch 1:1 Versuche in einem 14 m tiefen Schacht mit einem Durchmesser von 1,0 bis 1,3 m durchgeführt. In einem durch zwei Verschlüsse abgeschotteten, sandgefüllten Abschnitt im Schacht wurde Wasser von geringer Salinität über Leitungen injiziert und dessen Ausfluß gemessen. Einem Referenztest mit Betonverschlüssen folgte ein Haupttest, bei dem die Verschlüsse aus ca. 25 cm dickem Bentonitformsteinen aus hochverdichtetem Na-Bentonit-Pulver (MX-80, Wyoming-Bentonit) bestanden.

Ein Ergebnis dieser Versuche war, daß beim Haupttest der Wasser- ausfluß aus der Injektionskammer nur wenige Prozente von dem Wasser- ausfluß betrug, der mit den Betonverschlüssen gemessen wurde. Entlang der Grenzfläche Gestein/Ton konnte praktisch kein Wasserfluß gemessen werden. Die gemessenen Quelldrücke erreichten beim Haupttest nach einer Versuchsdauer von ca. 2 Monaten Werte von 0,2 bis 1,0 MPa. Danach nahmen die Quelldrücke weiter zu. Nach ca. 12 Monaten, als der Versuch abgebrochen wurde, betrugen die Quelldrücke maximal ca. 3 MPa. Einzelheiten hinsichtlich der Durchführung und der Ergebnisse dieser Versuche sind der in der EU 438 unter [13] aufgeführten Unterlage zu entnehmen.

(1.2) Wie kann das Quellverhalten der Bentonitformsteine ausreichend genau gesteuert werden (zeitlicher Verlauf und Größe des Quelldrucks)?

Bei der im o.g. Großversuch gemessenen relativ langsamen zeitlichen Entwicklung des Quelldrucks ist zu berücksichtigen, daß hier relativ

große Bentonitformsteine mit einer Dicke von 25 cm verwendet wurden. Durch die Wahl kleinerer Bentonitformsteine kann die zeitliche Entwicklung des Quelldrucks beschleunigt und damit gesteuert werden.

Ein Beispiel dafür, daß sich bei geringeren Abmessungen der Bentonitsteine der Quelldruck wesentlich schneller entwickelt, stellen die an der ETH Zürich durchgeführten Quelldruckversuche an 25 mm dicken scheibenförmigen Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 56 mm dar. Hier wurde an einem mit einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,92 \text{ g/cm}^3$  eingebauten Prüfkörper aus hochverdichtetem Na-Bentonit bereits nach ca. 6 Tagen ein Quelldruck von ca. 35 MPa gemessen (Abb. 1.1 und 1.2). Einzelheiten zu diesen Versuchen sind den in der EU 438 unter [11] und [12] aufgeführten Unterlagen zu entnehmen.

Ausgehend von den Ergebnissen der o.g. Quelldruckversuche wird nachfolgend der Nachweis geführt, daß mit dem Bentonitformsteinring der Variante B innerhalb von wenigen Tagen ein Quelldruck erzeugt werden kann, dessen Größe sich durch den Grad der Verdichtung des Bentonits, d.h. die Trockendichte, sowie die Spaltweite der zwischen den Bentonitformsteinen verbleibenden Fugen innerhalb weiter Grenzen steuern läßt.

Betrachtet man kubisch geformte Bentonitformsteine, die etwa das gleiche Volumen wie die in Zürich untersuchten zylindrischen Prüfkörper aufweisen, dann kann bei Bewässerung dieser Steine davon ausgegangen werden, daß sich innerhalb von ca. 6 Tagen ein Quelldruck  $\sigma_q$  aufbaut, dessen Größe von der zugelassenen Quelldehnung der Steine  $\epsilon_q$ , die sich etwa im gleichen Zeitraum einstellt, abhängig ist (Abb. 1.3).

Bei einer Kantenlänge dieser Steine von i. M. 5 cm läßt sich in den 25 cm breiten Ringraum (vgl. Abb. D-6.7) zwischen Gebirge und Kernverfüllung ein aus 5 Reihen bestehender Bentonitformsteinring einbauen (Abb. 1.4). Bei Wasserzufuhr quellen diese Steine auf, wobei die zugelassene Quelldehnung  $\epsilon_q$  näherungsweise dem relativen Fugenvolumen  $\epsilon_F$  des Bentonitformsteinrings entspricht, das auf der Abb. 1.5 angegeben ist.

Unter Verwendung der aus den Ergebnissen der Quelldruckversuche abgeleiteten Beziehung zwischen Quelldehnung und Quelldruck (vgl. Abb. D-6.2, oberes Diagramm in Abb. 1.6) läßt sich auf dieser Grundlage durch Vorgabe einer mittleren Spaltweite  $2a_1$  der Fugen der Quelldruck steuern. Je nach Verdichtungsgrad der eingebauten Bentonitformsteine läßt sich beispielweise ein Quelldruck zwischen 2,5 und 5,0 MPa durch mittlere Spaltweiten von ca. 4 bis 7 mm ( $\rho_{do} = 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) bzw. von ca. 8 bis 10 mm ( $\rho_{do} = 2,0 \text{ g/cm}^3$ ) erzeugen (Abb. 1.6, unteres Diagramm).

Bei der Variante A der mineralischen Abdichtung der Schächte Konrad wurde von einer Verfülleistung von ca. 3 m/Tag ausgegangen. Der für die Auflockerungszone erforderliche Stützdruck der Schachtverfüllung von ca. 1 MPa stellt sich dann bei dieser Variante nach einer Zeit von 38 Tagen ein (vgl. Abb. D-5.13).

Geht man auch für die Variante B von einer Verfülleistung von ca. 3 m/Tag aus, dann stellt sich - wenn man die auf der Abb. 1.3 skizzierte zeitliche Entwicklung des Quelldrucks unterstellt - jeweils in einer Tiefe von ca. 18 m unter der temporären Oberkante der mineralischen Abdichtung der endgültige Quelldruck  $\sigma_q$  ein, der näherungsweise dem Stützdruck der Schachtverfüllung entspricht (Abb. 1.7). Das bedeutet, daß mit der Variante B in kürzerer Zeit ein größerer Stützdruck erreichbar ist als mit der Variante A.

Abschließend soll noch nachgewiesen werden, daß bei Bewässerung des Bentonitformsteinrings über die zwischen den Formsteinen verbleibenden Fugen ein für das Quellen des Bentonitformsteinrings ausreichend großes Wasserangebot vorhanden ist.

Auf der Abb. 1.8 ist dazu zunächst die zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahme eines hochverdichteten Bentonitprüfkörpers dargestellt. Da die Wasserdurchlässigkeit des Prüfkörpers sehr gering ist, erfolgt die Wasseraufnahme praktisch ausschließlich durch Diffusion. Dies wird durch die gute Übereinstimmung zwischen gemessener und nach der Diffusionstheorie ermittelter Wasseraufnahme belegt (s. Unterlagen [11] und [12] aus EU 438).

Auf der Abb. 1.9 wird die Wassermenge berechnet, die ein 18 m tiefer und 25 cm breiter Bentonitformsteinring mit einem mittleren Radius von  $\bar{R} = 4,875$  m in 6 Tagen zum Aufbau des Quelldrucks benötigt. Dabei wird von dem auf der Abb. 1.8 auf der unteren Bildhälfte dargestellten Diagramm ausgegangen. Die hier nach 6 Tagen erforderlichen 3,7 Gew. % entsprechen bei diesem Beispiel einem Wasservolumen von ca.  $10 \text{ m}^3$  (Abb. 1.9).

Geht man von einer mittleren Spaltweite der Fugen zwischen den Bentonitformsteinen von 4 mm aus, dann beträgt das Fugenvolumen eines 18 m tiefen Bentonitformsteinrings ca.  $22 \text{ m}^3$  (Abb. 1.10).

Auf der Abb. 1.10 wird abgeschätzt welche Wassermenge bei planmäßiger Bewässerung dem Bentonitformsteinring drucklos zugeführt werden kann. Das hydraulische Gefälle ergibt sich in diesem Falle allein aus der Schwerkraft und beträgt  $i = 1$ . Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert wird unter der Annahme ermittelt, daß die mittlere Spaltweite der Fugen zwischen den Bentonitformsteinen 4 mm beträgt. Die Wasserdurchlässigkeit der Bentonitformsteine wird vernachlässigt. Unter diesen Bedingungen ergibt sich ein Wasserzufluß von ca.  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das bedeutet, daß das Fugenvolumen in sekundenschnelle mit Wasser gefüllt wäre. Auch die für den Aufbau des Quelldrucks in 6 Tagen für die Bentonitformsteine erforderliche Wassermenge von ca.  $10 \text{ m}^3$  stünde sofort zur Verfügung.

Die auf der Abb. 1.10 ermittelte Zuflußrate stellt die obere Grenze dar, die dem Bentonitformsteinring drucklos zugeführt werden kann. Selbst eine Zuflußrate von  $Q = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$ , das entspricht ca. 170 l/min, wäre ausreichend um die zum Quelldruckaufbau in einem 18 m tiefen Bentonitformsteinring erforderliche Wassermenge von  $10 \text{ m}^3$  innerhalb einer Stunde zur Verfügung zu stellen. Die Wasserzufuhr stellt bei dieser Variante also kein Problem dar.

- (1.3) Womit sollen die Bentonitsteine bewässert werden? Führt der spätere Einfluß von Salzwasser zu einem Abbau des Quelldrucks bzw. zu einer Schrumpfung?

Das Quellpotential der Bentonitformsteine wird durch die Salinität des Wassers nicht vermindert, weil es sich beim Quellen der Bentonitformsteine um innerkristallines Quellen handelt.

In trockenen, hochverdichteten Bentoniten liegen die Tonmineralschichten extrem dicht aufeinander. Beim Montmorillonit liegen die Schichtabstände in der Größenordnung von 1 nm. Bei so kleinen Schichtabständen werden die negativ geladenen Schichten und die Zwischenschichtkationen durch die van der Waalsschen Kräfte zusammengehalten. In Kontakt mit Wasser hydratisieren die Zwischenschichtkationen und ordnen sich zwischen den Schichten an. Dadurch wird der Schichtabstand bis auf das Doppelte des ursprünglichen Abstandes erhöht. Die Hydrationsenergie der Kationen ist wesentlich höher als die Energie, durch die die Schichten zusammengehalten werden. Deshalb können sehr hohe Quelldrücke ( $> 100$  MPa) auftreten. Das eingelagerte Wasser füllt als Hydrationswasser den gesamten Zwischenschichtraum aus. Es ist an die Zwischenschichtkationen gebunden und ist weniger beweglich als freies Porenwasser. Das Wasser mit den Zwischenschichtkationen im Zwischenschichtraum ist vergleichbar mit einer konzentrierten Salzlösung. Bei einem Wassergehalt von 25% entspricht der Natriumgehalt im Zwischenschichtwasser eines Na-Bentonits beispielsweise einer 3-n Salzlösung. Der beim innerkristallinen Quellen auftretende Quelldruck ist daher weitgehend unabhängig von der Salinität des Hydrationswassers.

Grundsätzlich verschieden vom innerkristallinen Quellen ist der Mechanismus des osmotischen Quellens, der erst auftreten kann, wenn das innerkristalline Quellen abgeschlossen ist. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine Entlastung, die zur Vergrößerung des Abstandes zwischen den Tonteilchen (Bildung diffuser Doppelschichten) und damit zur Bildung eines Porenraumes führt, in den weiteres Wasser eindringen kann. Da das osmotische Quellen auf dem Ausgleich des Konzentrationsunterschiedes zwischen den in der Doppelschicht elektrostatisch zurückgehaltenen Kationen und den Ionen im Poren-



wasser durch Diffusion beruht, ist der Quelldruck hier vom Elektrolytgehalt des Wassers abhängig. Durch eine Erhöhung der Salinität des Wassers kann es beim osmotischen Quellen zu einem Abbau des Quelldrucks kommen. Dies ist jedoch beim Bentonitformsteinring der Variante B der Schachtverfüllung auszuschließen, da der Quelldruck hier, wie bereits erwähnt, durch innerkristallines Quellen aufgebaut wird.

Dennoch sollen die Bentonitformsteine mit Wasser, dessen Salinität dem in der entsprechenden Teufe in der Unterkreide anstehenden Porenwasser entspricht, bewässert werden.

- (2) Zu Kapitel 5, Seitendruckbeiwert der mineralischen Abdichtung: Für Lockergestein wird üblicherweise der Ruhedruckbeiwert nach der Gleichung  $K_0 = 1 - \sin \varphi$  ermittelt. Wie wird der hier gewählte Ruhedruckbeiwert von  $K_0 = 0,5$  (anstatt  $K_0 = 1 - \sin 43^\circ = 0,32$ ) begründet?

Für die Kernverfüllung wurde von einem elastischen Verhalten ausgegangen. Deshalb wurde für den Ruhedruckbeiwert die Beziehung

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$$

verwendet. Diese Beziehung führt für die für die Kernverfüllung angenommene Poissonzahl von  $\nu = 0,33$  zu  $K_0 = 0,5$ . Legt man die empirische Beziehung für den Ruhedruckbeiwert von Jáky

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

zugrunde, dann ergibt sich für das Dyckerhoff-Mineralgemisch der Kernverfüllung mit  $K_0 = 0,32$  ein etwas kleinerer Wert, der einer Poissonzahl von  $\nu = 0,24$  entspricht.

Da der Ruhedruckbeiwert von Lockergesteinen mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist, wurden Sensitivitätsanalysen mit anderen  $K_0$ -Werten durchgeführt, die nicht in der EU 438 dargestellt sind. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen jedoch, daß der Stützdruck,

der mit der Variante A der Schachtverfüllung erreichbar ist, nicht wesentlich von dem für die Kernverfüllung gewählten Ko-Wert abhängig ist.

- (3) Zu Kapitel 5, Spannungs-Dehnungsbeziehung für den Füllkern:  
Die Radialverschiebung des Füllkerns wird vom Antragsteller näherungsweise nach dem ebenen Spannungszustand berechnet. Sie ergibt sich danach um ca. 33% größer als bei ebenem Verformungszustand (weicherer Verhalten; Abb. D-5.15). Wurde dieses nachgiebigere Kernverhalten bewusst als auf der sicheren Seite liegend angenommen?

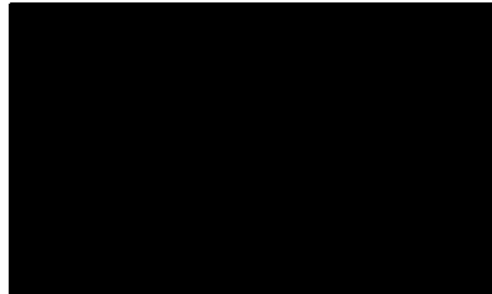
Der auf der Abb. D-5.15 angegebenen Formel zur Bestimmung der Radialverschiebung der Kernverfüllung liegt kein ebener Spannungszustand zugrunde. Die Ableitung dieser Formel ist auf den Abb. 3.1 bis 3.3 skizziert. Sie basiert auf der Elastizitätstheorie (Abb 3.1) sowie der Silotheorie (Abb 3.2).

Da der Steifemodul der Kernverfüllung spannungsabhängig ist, mußte für die Spannungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Kernverfüllung eine Annahme getroffen werden. Diese Annahme führt unter der speziellen Randbedingung  $\epsilon_{rk} = 0$  zu der am ██████████-Mineralgemisch in Laborversuchen ermittelten Abhängigkeit des Steifemoduls von  $\sigma_z$ . Setzt man die auf der Abb. 3.3 abgeleitete Beziehung (5) für den Elastizitätsmodul in die Formel (2) auf der Abb. 3.2 ein, dann ergibt sich die auf der Abb. D-5.15 angegebene Formel zur Beschreibung der Kennlinie der Kernverfüllung.

- (4) Zu Kapitel 5, Gleichung für den Steifemodul der mineralischen Abdichtung:  
Wurde der Steifemodul für das Füllmaterial der Variante B bewusst abweichend vom Steifemodul für das Füllmaterial der Variante A definiert (Abb. D-5.15 bzw. D-6.5)?

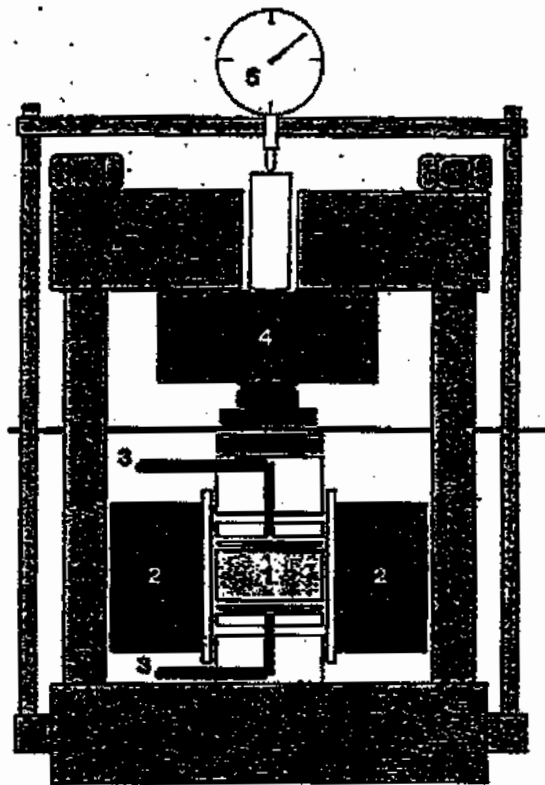
Die Definition des spannungsabhängigen Steifemoduls ist für beide Varianten gleich. Die Formel zur Berechnung der radialen Stauchung der Kernverfüllung infolge einer Erhöhung der Radialspannung für die Variante B auf Abb. D-6.5 unterscheidet sich deshalb von der ent-

sprechenden Formel für die Variante A auf Abb. D-5.15, weil bei der Variante B davon ausgegangen wird, daß die Dehnung der Kernverfüllung infolge Quellen des Bentonitformsteinrings in vertikaler Richtung verhindert wird. Die Ableitung dieser Formel ist der Abb. D-6.5 zu entnehmen.



**Anlagen:**

- Abb. 1.1 bis 1.10
- Abb. 3.1 bis 3.3



### Beispiel

- 1 Bentonitprobe,  
D = 56.4 mm, H = 25 mm,
- 2 Heizung,
- 3 Wasserzufuhr,
- 4 Kraftmessdose,
- 5 Deformationsmessuhr

Trockendichte, vor dem Versuch :

$$\rho_d = 1,92 \text{ g/cm}^3$$

Reduzierte Trockendichte nach dem Versuch :

$$\begin{aligned} \rho_{red} &= \frac{\rho_d}{1 + \frac{\Delta V}{V_0}} = \frac{\rho_d}{1 + \frac{\Delta H}{H}} \\ &= \frac{1,92}{1,08} = 1,78 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Abb. 11

Quelldruckapparatur mit hochverdichtetem  
Bentonitprüfkörper ( Na-Bentonit MX-80 )



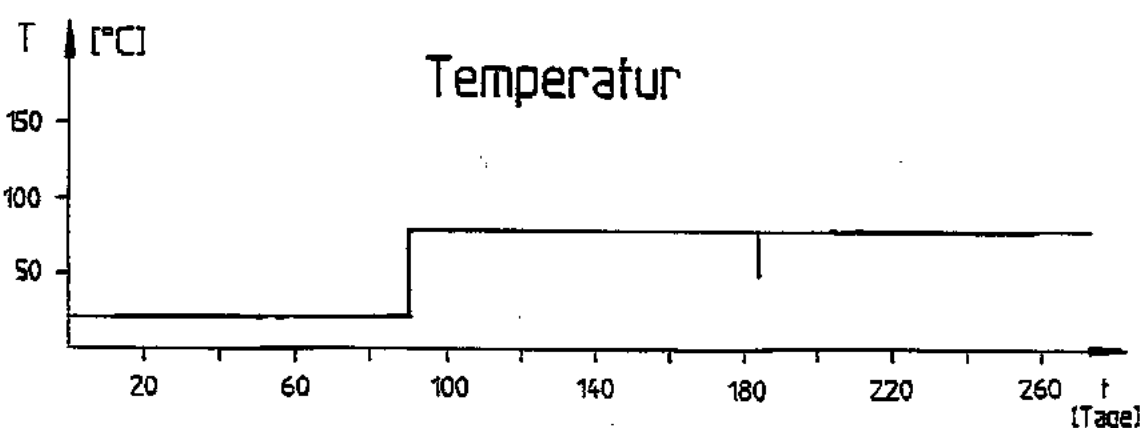
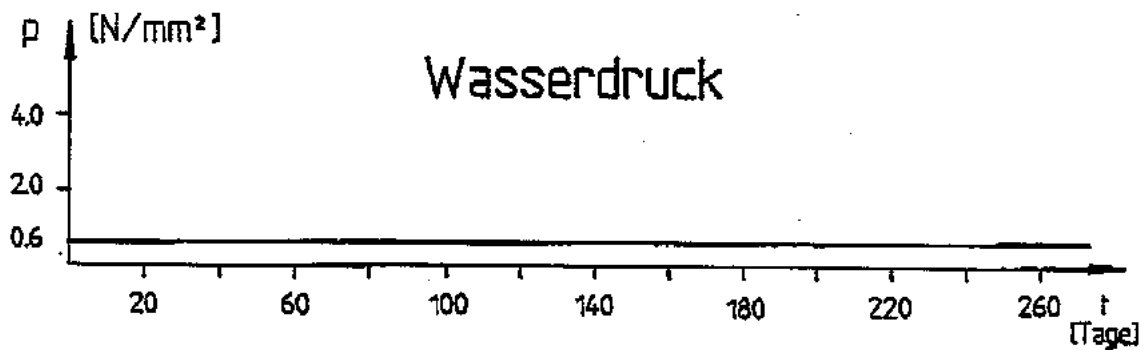
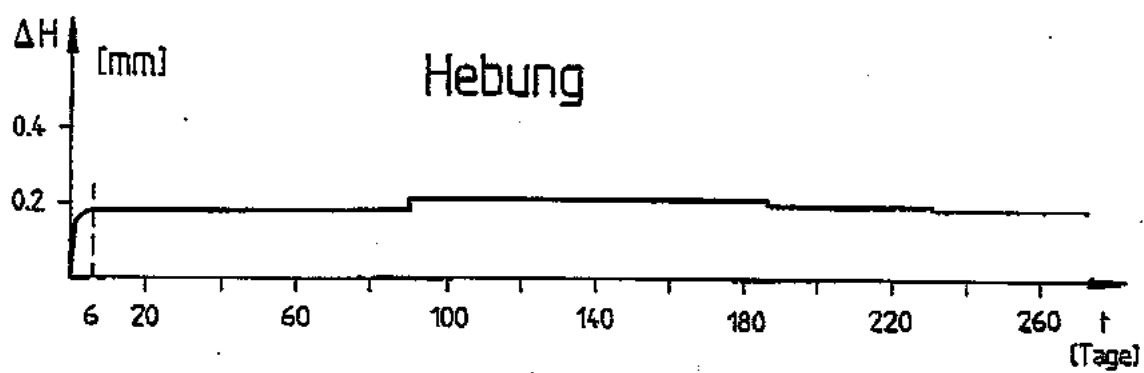
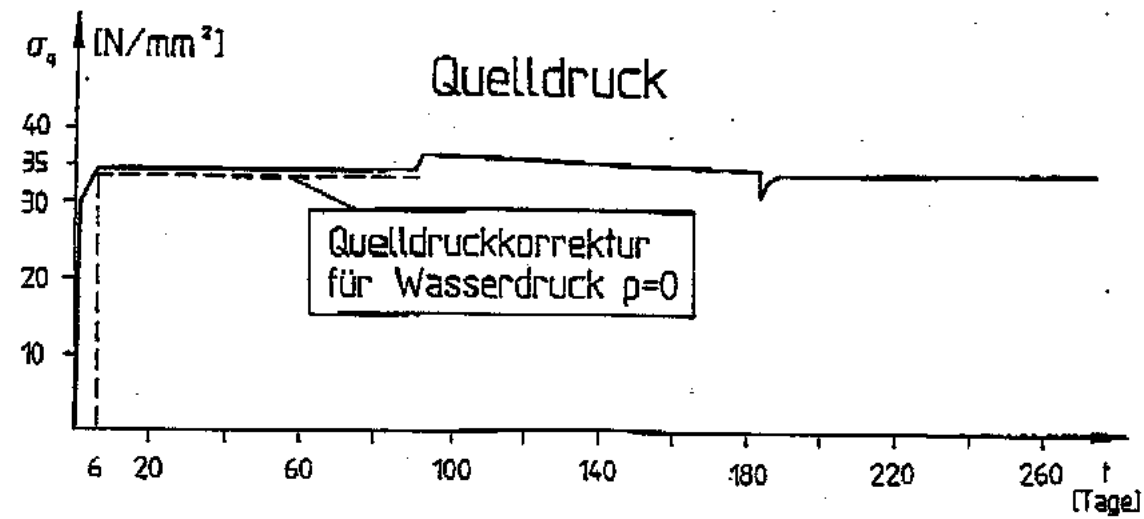


Abb. 12

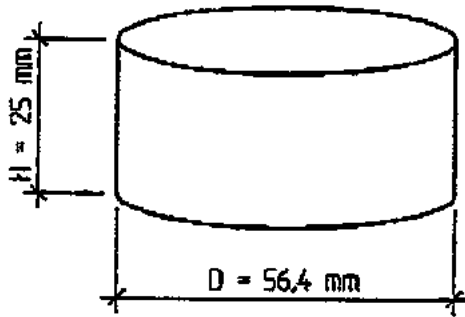
Ergebnis eines Quelldruckversuches an hochverdichtetem Na-Bentonit MX-80.

AD-Nr. / KONS/CO19302



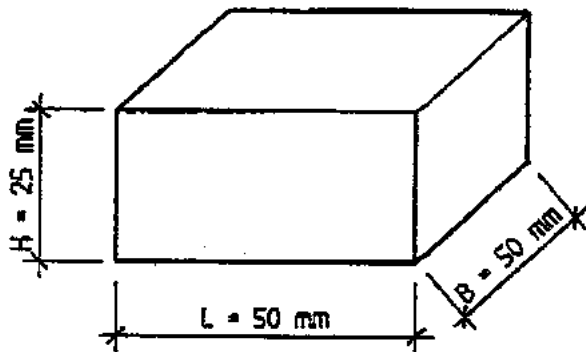
Endlager Konrad :  
Schachtverfüllung  
(EU 438)

Zylindrischer, scheibenförmiger Prüfkörper



$$V_z = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot H = 62.6 \text{ cm}^3$$

Kubischer Bentonitformstein mit gleichem Volumen



$$V_k = H \cdot L \cdot B = 62.5 \text{ cm}^3$$

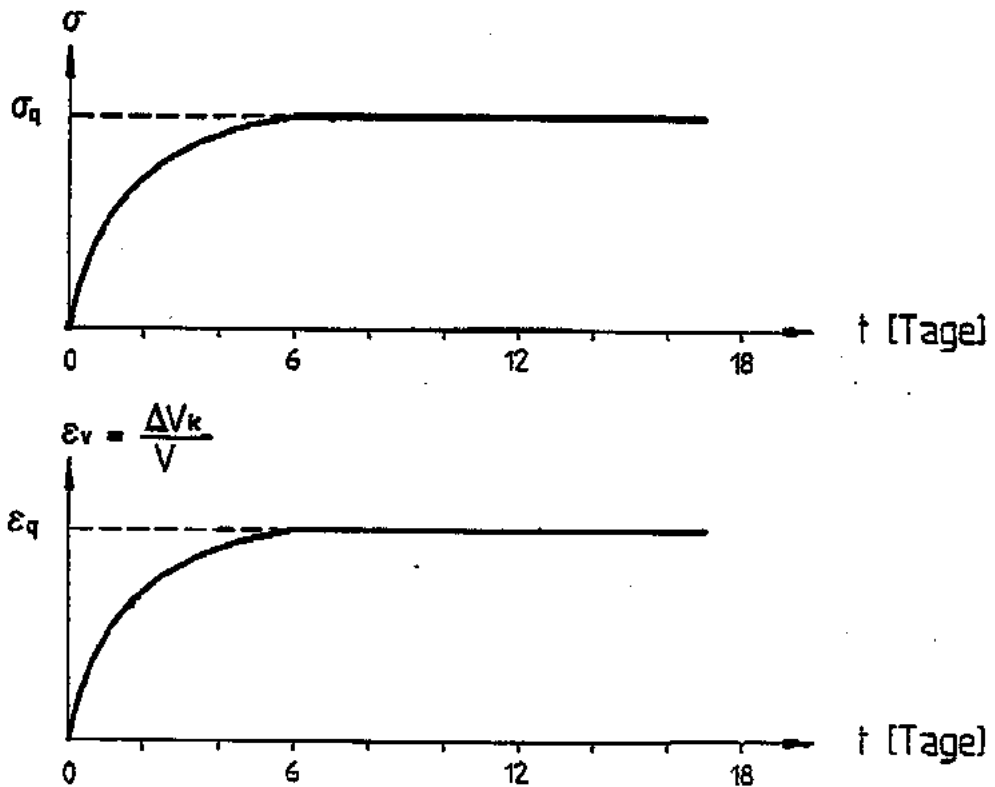
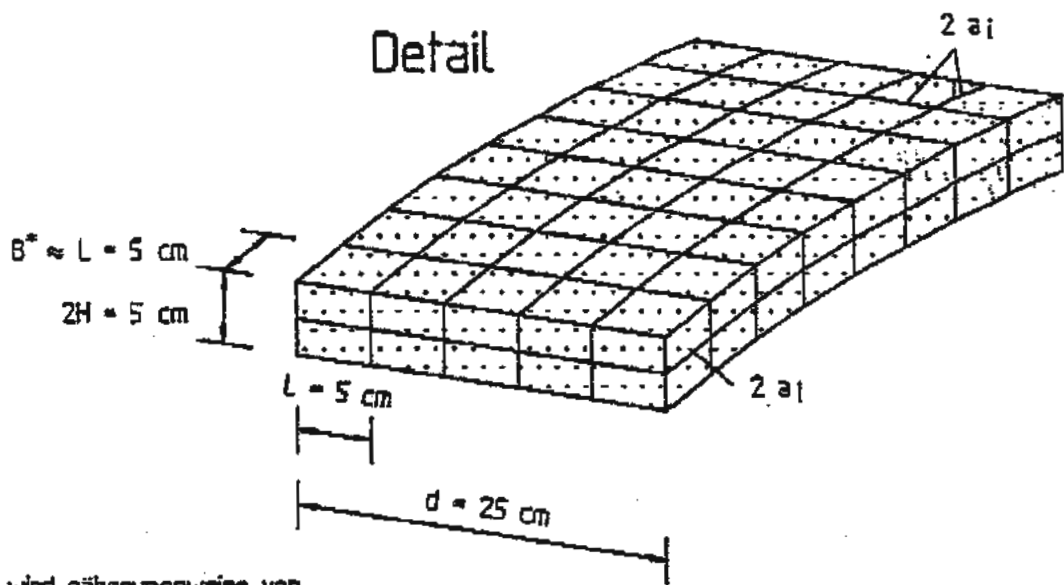
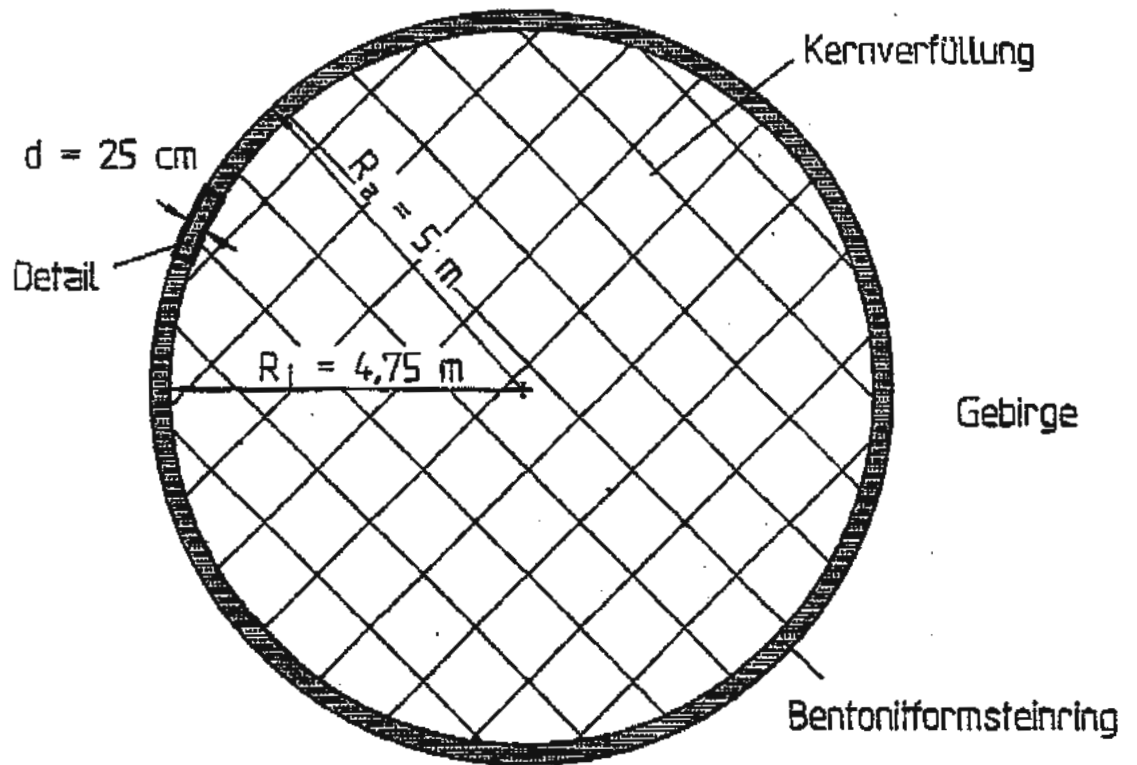


Abb. 13

Zeitliche Entwicklung des Quelldrucks und der Quelldehnung von Bentonitformsteinen





\*) Es wird näherungsweise von konstanter Breite der Bentonitformsteine ausgegangen.

Abb. 14

Dimensionierung des Bentonitformsteinrings



### Volumenanteil der Fugen :

$$V_F = V - V_B$$

$V$  = Gesamtvolumen des Bentonitformsteinrings

$V_B$  = Volumen der Bentonitformsteine

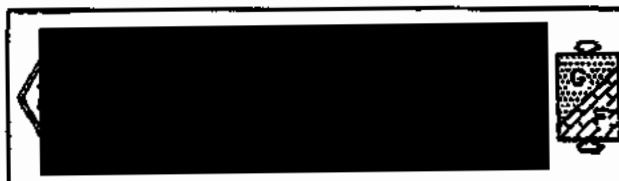
$$\begin{aligned} V_F &= U \cdot d \cdot 1 - U_B \cdot d_B \cdot 1 \\ &= n \cdot (L + 2a_i) \cdot 5(L + 2a_i) - n \cdot L \cdot 5 \cdot L \\ &= 5 \cdot n \cdot (L^2 + 2 \cdot 2a_i L + (2a_i)^2 - L^2) \\ &= 5 \cdot n \cdot 2a_i \cdot (2L + 2a_i) \\ &\approx 10 \cdot n \cdot 2a_i \cdot L \end{aligned}$$

### Relatives Fugenvolumen :

$$\varepsilon_F = \frac{V_F}{V} \approx \frac{10 \cdot n \cdot 2a_i \cdot L}{5 \cdot n \cdot (L + 2a_i)^2} \approx 2 \left( \frac{2a_i}{L} \right)$$

Abb. 15

Fugenvolumen des Bentonitformsteinrings





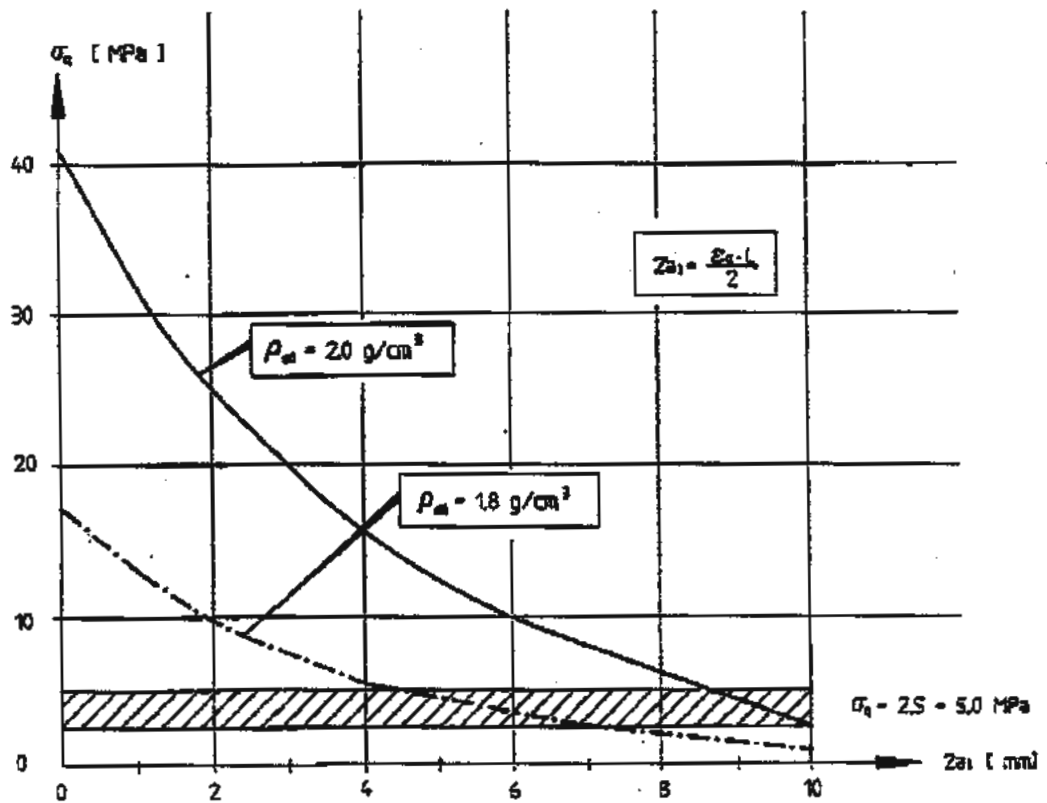
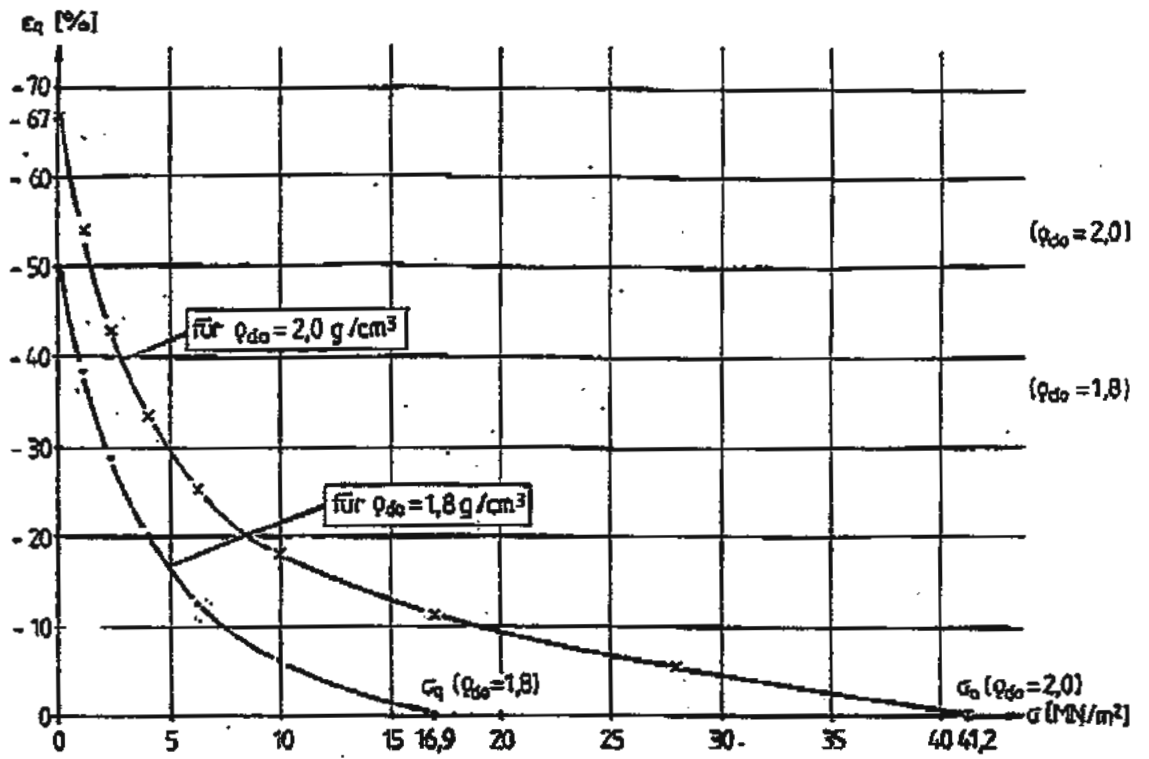
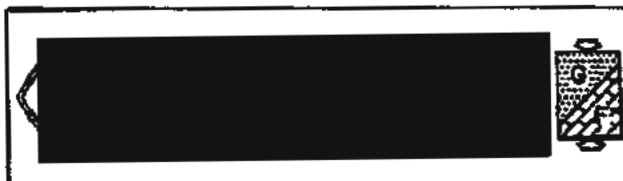


Abb. 16

Steuerung des Quelldrucks durch die Fugen zwischen den Bentoniformsteinen



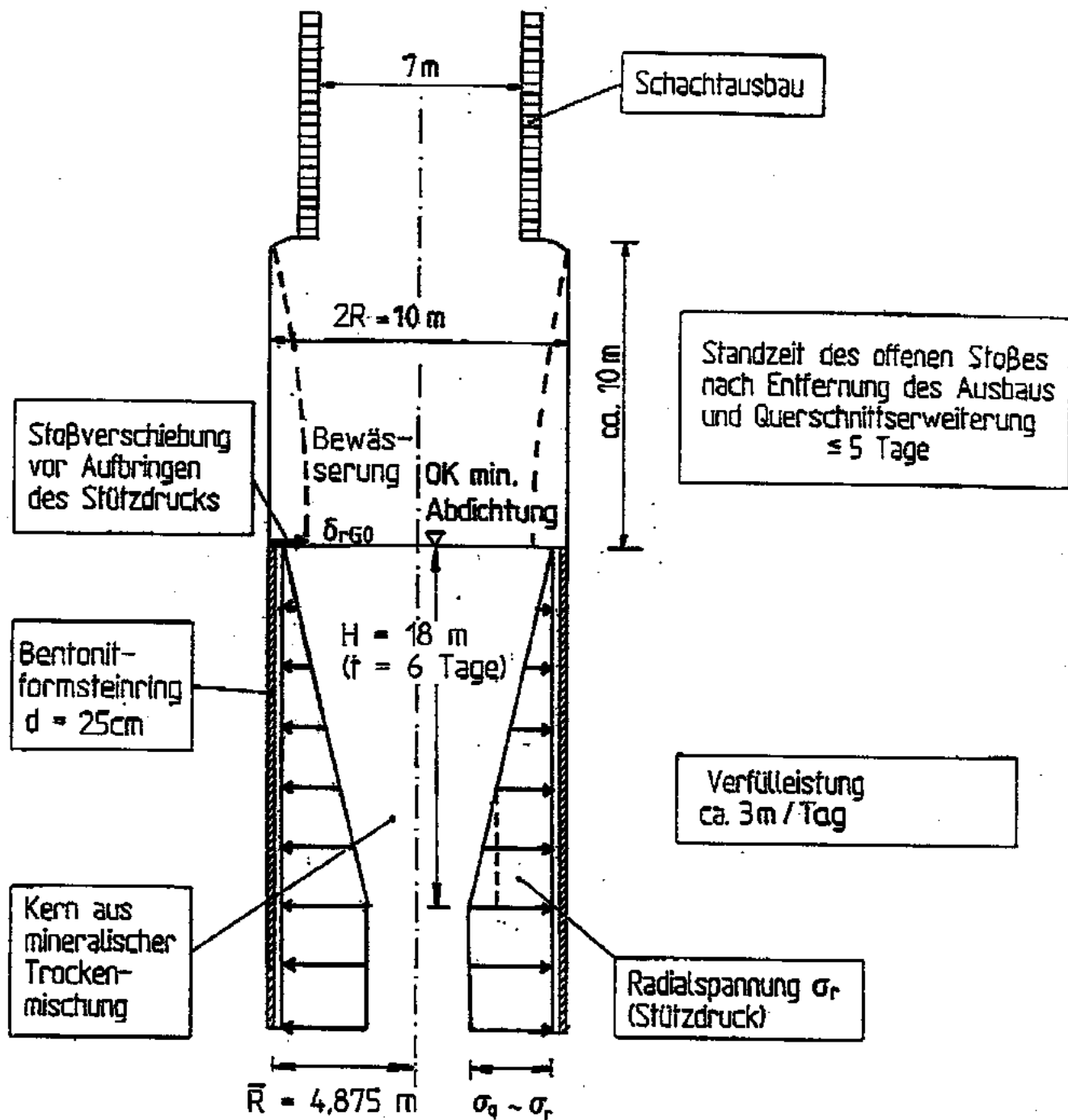


Abb. 17

Mineralische Abdichtung - Variante 8  
Entwicklung des Quelldrucks



Endlager Konrac

Schachtfüllung  
(EU 438)

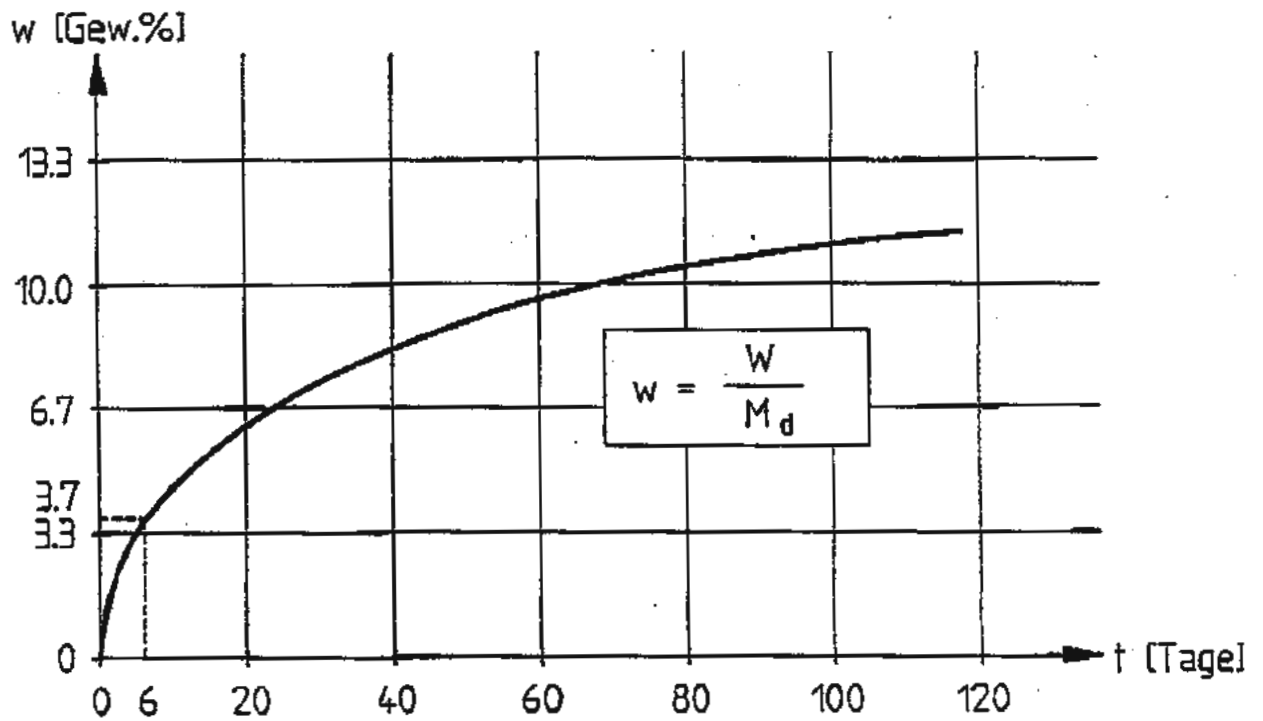
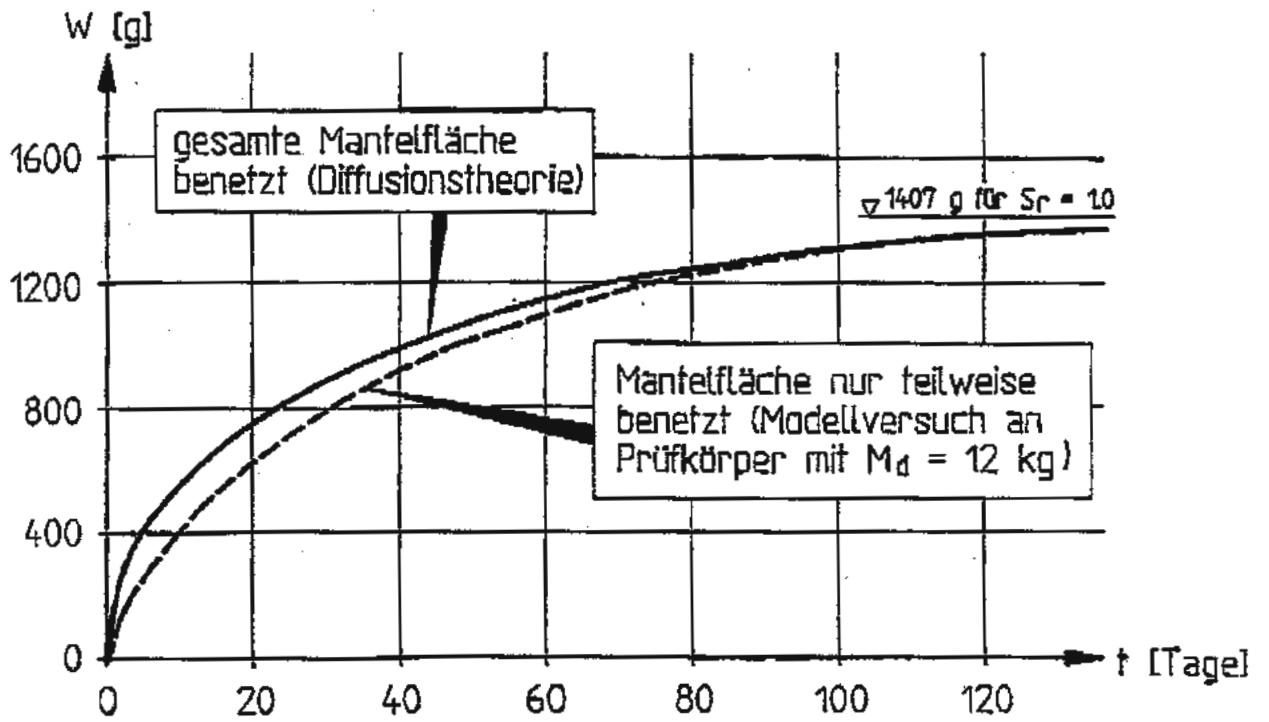


Abb. 18

Wasseraufnahme der Bentonitformsteine durch Diffusion



$$w = \frac{W}{M_d} = 0,037$$

$$W = \rho_V \cdot \Delta V_W$$

$$M_d = \rho_d \cdot V_0$$

$$V_0 = 2\pi \cdot \bar{R} \cdot d \cdot H$$

$$\Rightarrow w = \frac{\rho_V \cdot \Delta V_W}{\rho_d \cdot V_0}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta V_W &= \frac{w \cdot \rho_d \cdot V_0}{\rho_V} \\ &= \frac{0,037 \cdot 1,92 \cdot 2\pi \cdot 4,875 \cdot 0,25 \cdot 18}{1,0} \\ &\approx 10 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Abb. 1.9

Wasseraufnahme des Bentonitformsteinrings in 6 Tagen



Endlager Konrad

Schachtverfüllung  
(EU 438)

Hydraulisches Gefälle ( $p = 0$ ):

$$i = \frac{\partial}{\partial z} \left( z + \frac{p}{\gamma_w} \right) = \frac{\partial z}{\partial z} = 1$$

Wasserdurchlässigkeitsbeiwert ( $2a_1 = 4 \text{ mm}$ ):

$$k_f = \underbrace{\frac{g}{12\nu} \cdot (2a_1)^2 \cdot \frac{2a_1}{L}}_{\text{radiale Fugen}} + \underbrace{\frac{g}{12\nu} \cdot (2a_1)^2 \cdot \frac{2a_1}{L}}_{\text{tangentielle Fugen}}$$

$$= \frac{g}{6\nu} \cdot \frac{(2a_1)^3}{L} = \frac{4^3}{30} = 2,1 \text{ m/s}$$

Wasserzufluß:

$$Q = v \cdot A = k_f \cdot i \cdot 2\pi \cdot \bar{R} \cdot d \approx 16 \text{ m}^3/\text{s}$$

Fugenvolumen:

$$V_f = 2 \left( \frac{2a_1}{L} \right) \cdot 2\pi \cdot \bar{R} \cdot d \cdot H = 22,1 \text{ m}^3$$

- die zum Quellen erforderliche Wassermenge steht sofort zur Verfügung
- das gesamte Fugenvolumen ist sofort mit Wasser ausgefüllt

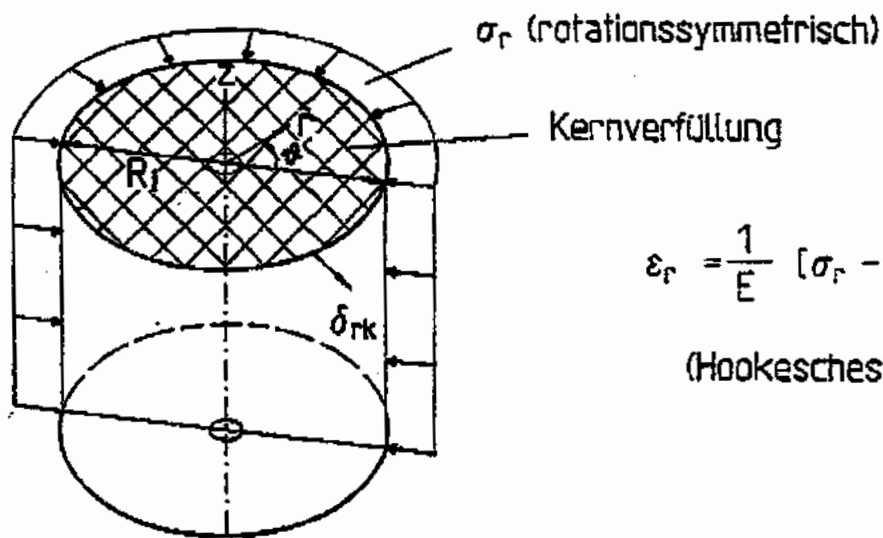
Abb. 1.10

Wasserangebot bei planmäßiger Bewässerung



Endlager Konrad

Schachtverfüllung  
(EU 438)



$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu (\sigma_\phi + \sigma_z)]$$

(Hookesches Gesetz)

Gleichgewichtsbedingung :

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\phi r}}{\partial \phi} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0$$

$$\sigma_r = \text{const} \quad , \quad \tau_{\phi r} = 0$$

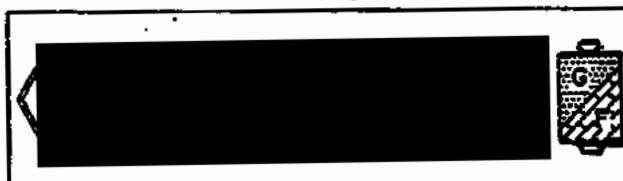
$$\Rightarrow \sigma_r = \sigma_\phi$$

$$\Rightarrow \varepsilon_r = \frac{1}{E} [(1 - \nu) \cdot \sigma_r - \nu \cdot \sigma_z]$$

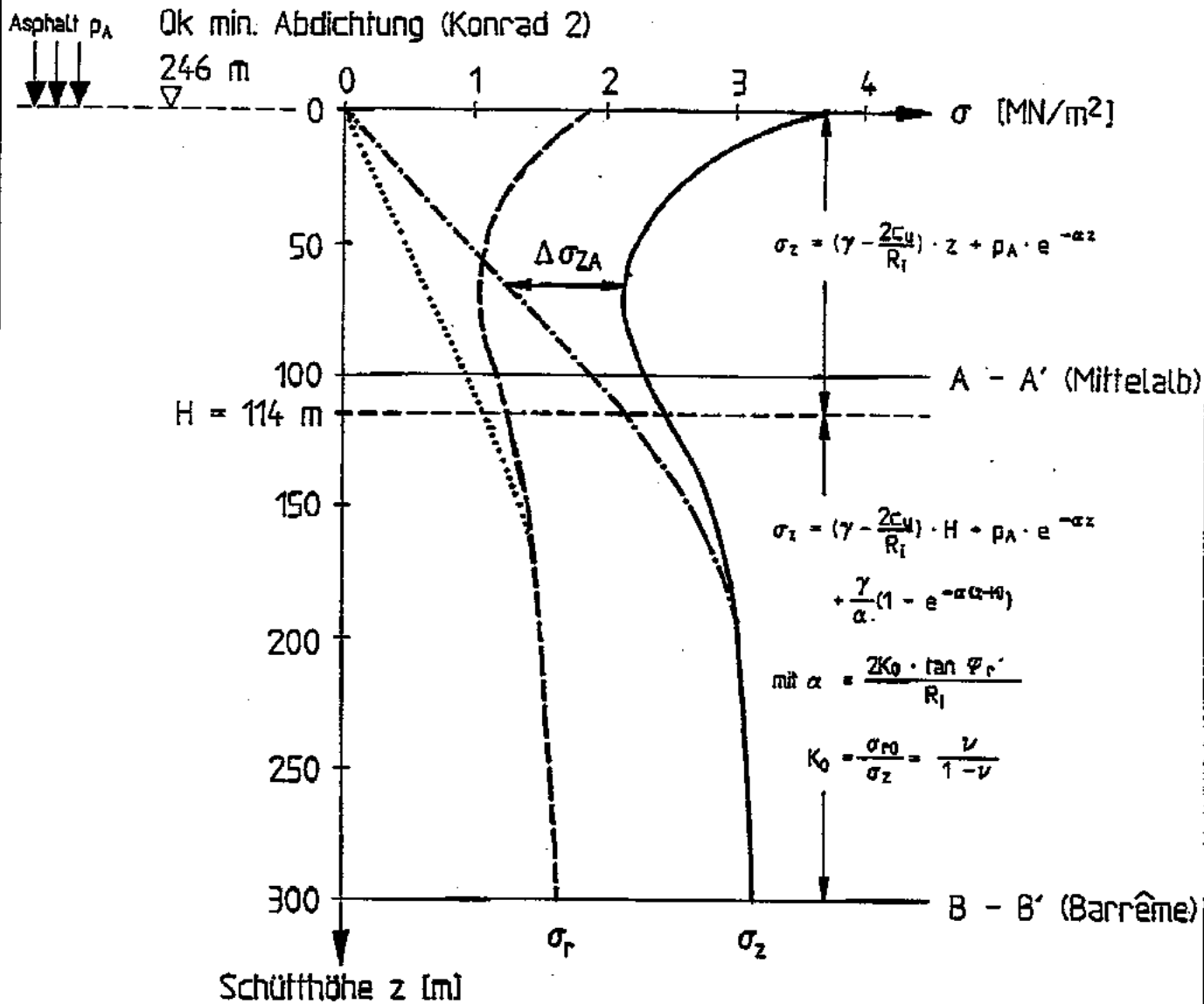
$$\begin{aligned} \delta_{rk} &= \int_0^{R_i} \varepsilon_r \, dr = \varepsilon_r \cdot R_i \\ &= \frac{R_i}{E} [(1 - \nu) \cdot \sigma_r - \nu \cdot \sigma_z] \quad (1) \end{aligned}$$

Abb. 3.1

Ableitung der Kennlinie des Kerns  
für die Variante A (1)



## Ermittlung von $\sigma_z$ nach der Silotheorie :



Einsetzen von  $\nu \cdot \sigma_z = (1 - \nu) \cdot \sigma_{r0}$  in (1) :

$$\delta_{rK} = \frac{R_i}{E} (1 - \nu) \cdot (\sigma_r - \sigma_{r0}) \quad (2)$$

Abb. 3.2

Ableitung der Kennlinie des Kerns für die Variante A (II)



Ansatz für den spannungsabhängigen Elastizitätsmodul der Kernverfüllung :

$$E(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z) = a + b(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta \Rightarrow E(\sigma_r, \sigma_z) = a + b(2\sigma_r + \sigma_z)$$

Für  $\sigma_r = \sigma_{r0}$  gilt :

$$\begin{aligned} E(\sigma_z) &= \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot E_S(\sigma_z) \\ &= \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} (E_{S0} + \nu_e \cdot \sigma_z) \quad (3) \end{aligned}$$

$$= a + b \left( \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \right) \cdot \sigma_z \quad (4)$$

Der Koeffizientenvergleich von (3) und (4) liefert :

$$a = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot E_{S0}, \quad b = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 + \nu} \cdot \nu_e$$

$$\Rightarrow E(\sigma_r, \sigma_z) = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} [E_{S0} + \nu_e \cdot \left( \frac{1 - \nu}{1 + \nu} \right) \cdot (2\sigma_r + \sigma_z)] \quad (5)$$

### Abb. 33

Ableitung der Kennlinie des Kerns für die Variante A (III)



Endlager Konrad

Schachtverfüllung  
(EU 438)