

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 28

**Untersuchungen der physikalischen und
chemischen Eigenschaften von Bentonit-
Zement-Suspensionen im frischen und
erhärteten Zustand**

von
Magret Geil

Braunschweig 1989

Vorwort des Herausgebers:

Der Begründer des Instituts, Professor Dr.-Ing. Hanns Simons, der leider viel zu früh im Jahre 1984 verstarb, hat sehr früh erkannt, daß bereits seit langem im Grund- und Wasserbau gebräuchliche Abdichtungsverfahren einen wesentlichen Beitrag für den Umweltschutz liefern können. Daher sind Problemstellungen, die sich im Zusammenhang mit mineralischen Deponieabdichtungen ergeben, seit einigen Jahren Gegenstand engagiert durchgeführter Forschungsarbeiten. Ein Forschungsschwerpunkt behandelt die Abdichtung von neu anzulegenden oder bereits verfüllter Deponien durch Dichtwände aus Bentonit-Zement-Suspensionen, die im Schlitzwandverfahren hergestellt werden.

Die vorliegende Dissertation von Frau M. Geil, die sich mit der Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Dichtwandmassen beschäftigt, entstand noch auf Anregung von Professor Simons. Sie stellt eine weitere Ergänzung der bereits am Institut durchgeführten und noch laufenden Arbeiten an Dichtwandmassen dar. Das in dieser Arbeit vorgestellte Untersuchungsschema von Bentonit-Zement-Suspensionen kann für den Ingenieur eine Hilfestellung bei der Planung und Ausführung von Deponiedichtwänden geben.

Die durchgeführten Untersuchungen wurden dankenswerter Weise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst finanziell gefördert.

Braunschweig im Juli 1989



(Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz)

**UNTERSUCHUNGEN DER PHYSIKALISCHEN UND
CHEMISCHEN EIGENSCHAFTEN VON
BENTONIT-ZEMENT-SUSPENSIONEN IM FRISCHEN UND
ERHÄRTETEN ZUSTAND**

Vom Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl.-Ing. Magret Geil
aus Eckwarden/Kreis Wesermarsch

Eingereicht am:	01. Oktober 1987
Mündliche Prüfung am:	12. August 1988
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. P. Großkurth
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. H. L. Jessberger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig. Die Anregung zur Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Dichtwandmassen gab Prof. Dr.-Ing. H. Simons, der leider kurz vor Beendigung dieser Arbeit unerwartet verstarb. Die Abdichtung von Mülldeponien mit Dichtungswänden aus Bentonit-Zement-Suspensionen war eines seiner mit großen Engagement verfolgten Forschungsgebiete. Ihm gilt mein besonderer Dank für die Förderung und Unterstützung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Großkurth und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jessberger danke ich für die Übernahme der Berichterstattung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Kayser gilt mein Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Arand für die Übernahme des Amtes eines Prüfers.

Bei der Durchführung und Auswertung der umfangreichen experimentellen Untersuchungen waren mir Mitarbeiter und studentische Hilfskräfte behilflich. Ihnen allen sowie meinen ehemaligen Kollegen danke ich für die Unterstützung, daß trotz unvorhersehbarer Verzögerung die Arbeit fertiggestellt wurde.

Die finanziellen Mittel zur Durchführung der Forschungsarbeiten wurden z.T. aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft, DFG, und aus Mitteln des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft und Kunst zur Verfügung gestellt.

Braunschweig, im Mai 1989

M. Geil

Summary

This thesis introduces a research programme for the production and examination of bentonite-cement suspension (BZS) with selected bentonite criterion for stability of cement. Besides a description of the physical and chemical characteristics of bentonite and cement, the reciprocal action of nonhardened and hardened suspensions will be presented. Depending on the quality of bentonite, concentration, type of cement and cement concentration, graphs concerning viscosity, filtration and liquid limit are given. With these curves it is possible to estimate the behaviour of the Na-BZS and Ca-BZS in their non-mixed and mixed states after their production and to select the best possible concentration of bentonite and cement in the mixture. The influence of bentonite is marked by the ion exchange capacity and the influence of cement is characterized by the amount of blast furnace slag (HOS). The degree of hydration of BZS is calculated by the chronological changes of the density of soil particles, density of moist soil and water content.

The chronological development of the permeability is dependent on the test liquid and its corrosive effect on bentonite and cement.

An accelerated testing method concerning the examination of resistance dependent on the sample age and hydraulic gradient is introduced. An important parameter for the resistance is the rate of percolation for calcium.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einleitung und Problemstellung 1
2	Bisherige Untersuchungen 2
2.1	Eigenschaften von frischen Bentonit-Zement- Suspensionen 2
2.2	Erhärtung von Bentonit-Zement-Suspensionen 4
2.3	Festigkeit, Durchlässigkeit und Erosions- sicherheit von Dichtwandmassen 5
2.4	Chemische Beständigkeit 9
2.5	Zusammensetzungen von Dichtwandmassen 14
3	Ziele der eigenen Arbeit 17
4	Anforderungen an Dichtungswände und Eigenschaften der einsetzbaren Materialien 20
4.1	Dichtungswände 20
4.1.1	Einphasenverfahren 20
4.1.2	Kombinationsdichtungen 21
4.2	Dichtungsmassen 21
4.2.1	Herstellung und Einbau der Dichtungsmassen 22
4.2.2	Verarbeitbarkeit 23
4.2.3	Einfluß der Verarbeitbarkeit auf die herstellbare Wandtiefe 23
5	Beschreibung der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Bentonit und Zement in BZS 25
5.1	Bentonit 25
5.1.1	Bentonitsorten 28
5.1.2	Aufgaben des Bentonits 33
5.2	Zement 34
5.2.1	Zementsorten 35

5.2.2	Aufgaben des Zementes	36
5.3	Bentonit-Zement-Suspension	36
5.3.1	Frischsuspensionen	36
5.3.2	Erhärtende Bentonit-Zement-Suspensionen ...	38
5.3.2.1	Porenzahl und W/Z-Faktoren	40
5.3.2.2	Bindungskräfte	42
5.3.2.3	Reduzierter Wasser-Zement-Faktor ..	45
5.4	Zusammenfassung	46
6	Beschreibung und Ergebnisse eigener Baustellenmessungen	48
6.1	Dichtwand Ingelheim	48
6.1.1	Baustellenbeschreibung	48
6.1.2	Messungen auf der Baustelle und Darstellung der Ergebnisse	59
6.2	Dichtwand Leverkusen	60
6.2.1	Baustellenbeschreibung	60
6.2.2	Messungen auf der Baustelle und Darstellung der Ergebnisse	60
6.3	Zusammenfassung	76
7	Eigene Laboruntersuchungen	79
7.1	Physikalische Eigenschaften der Na-BZS	80
7.1.1	Zusammensetzung	80
7.1.2	Einflüsse auf die Viskosität bewegter und unbewegter BZS	83
7.1.2.1	Zementsorte und -konzentration	83
7.1.2.2	Bentonitsorten und -konzentration .	87
7.1.2.3	Einfluß von HOS	94
7.1.3	Stabilität	98
7.1.4	Filtratwasserabgabe	99
7.1.4.1	Bentonitsorte	100
7.1.4.2	Bentonitkonzentration	101
7.1.4.3	Zementsorte	103
7.1.4.4	Zementkonzentration	103
7.1.4.5	Rührbewegung	104
7.1.4.6	Veränderung der Filtratwasserabgabe bei Zementzugabe	107

7.1.5	Fließgrenze	111
7.4	Physikalische Eigenschaften der Ca-BZS	116
7.4.1	Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter	117
7.4.2	Filtratwasserabgabe	117
7.4.3	Fließgrenze	121
7.5	Zusammenfassung	122
8	Untersuchung der Kennwerte vor und nach Hydratation ...	125
8.1	Kennwerte vor Beginn der Hydratation	125
8.2	Kennwerte nach der Hydratation	126
8.2.1	Bestimmung der Korndichte	130
8.2.2	Berechnung des Wassergehaltes	131
8.2.3	Berechnung der Dichte	131
8.2.4	Berechnung der Trockendichte, des Poren- anteils und der Sättigungszahl	131
8.3	Veränderung der Korndichte während der Hydratation	136
8.4	Folgerungen	137
9	Untersuchung der Erhärtung und Wasserdurchlässigkeit ..	138
9.1	Erstarrungsverhalten	138
9.2	Erhärtung	144
9.2.1	Na-BZS	144
9.2.2	Ca-BZS	146
9.3	Einfluß der Erhärtung auf die Wasserdurch- lässigkeit	148
9.3.1	Hydratationsgrad nach 28 Tagen	152
9.3.2	Wasserdurchlässigkeit ausgehärteter Proben	152
9.3.2.1	Na-BZS	152
9.3.2.2	Ca-BZS	156
9.4	Einfluß der Prüfflüssigkeit auf die Wasser- durchlässigkeit	159
9.5	Zusammenfassung und Folgerungen	160
9.6	Auswahl von BZS für Dauerversuche	152
10	Prüfmethoden zur Untersuchung von Dauerbeständigkeit ..	165
10.1	Chemismus beim Durchströmen von Proben mit Prüfflüssigkeiten	165
10.2	Versuchsparameter	166

10.3	Prüfflüssigkeiten	167
10.3.1	Schwefelsäure	167
10.3.2	Natronlauge	168
10.3.3	Ammoniumchlorid	168
10.3.4	Aqua-dest.	169
10.4	Durchführung der Beständigkeitsversuche	170
10.4.1	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes bei Durchströmung mit Prüfflüssigkeiten ...	170
10.4.2	Chemische Analysen	173
10.4.3	Versuchsprogramm	173
11	Ergebnisse der zeittraffenden Untersuchungen	175
11.1	Untersuchungen an erhärtenden Na-BZS	175
11.1.1	Abhängigkeit des k-Wertes vom hydraulischen Gefälle	175
11.1.2	Einfluß der Prüfflüssigkeit Aqua-dest.	177
11.1.3	Einfluß der Prüfflüssigkeit Schwefelsäure .	177
11.1.4	Beurteilung	180
11.2	Untersuchungen an erhärtenden Ca-BZS	180
11.2.1	Entwicklung der Durchlässigkeit	181
11.2.1.1	Durchströmung mit Aqua-dest.	186
11.2.1.2	Durchströmung mit Schwefelsäure ..	188
11.2.1.3	Durchströmung mit Ammoniumchlorid	190
11.2.1.4	Durchströmung mit Natronlauge	190
11.2.2	Festigkeit durchströmter und undurch- strömter Proben	190
11.2.3	Ca-Ausspülraten	192
11.2.3.1	Durchströmung mit Aqua-dest.	192
11.2.3.2	Durchströmung mit Schwefelsäure ..	195
11.2.3.3	Durchströmung mit Ammoniumchlorid	195
11.2.3.4	Durchströmung mit Natronlauge	197
11.2.4	Nadeleindringversuche	197
11.2.5	Beurteilung	198
12	Zusammenfassung	201

Liste der verwendeten Abkürzungen

B	Bentonit
B/Z	Bentonit/Zement-Faktor
BZS	Bentonit-Zement-Suspension
Ca-BZS	Calciumbentonit-Zement-Suspension
Na-BZS	Natriumbentonit-Zement-Suspension
DWM	Dichtwandmasse
HOS	Hochofenschlacke
HOZ 35L	Hochofenzement
HOZ 35L-NW/HS	Sulfatbeständiger Hochofenzement
PZ	Portlandzement
P	Primärlamellen
S	Sekundärlamellen
W	Wasser
Z	Zement
45/150	BZS mit 45 kg Bentonit pro m ³ Wasser und 150 kg Zement pro m ³ BZS

Chemische Begriffe, Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Einheit	Benennung
Al_2O_3		Aluminiumsilikathydrat
Ba		Barium
Ca		Calcium
CaO		Calciumoxid
CaCl_2		Calciumchlorid
$\text{Ca}(\text{OH})_2$		Calciumhydroxid
C_2S		Dicalciumsilikat
C_3S		Tricalciumsilikat
CSH		Calciumsilikathydrat
Cl^-		Chlorid-Anion
CO_2		Kohlendioxid
H_2O		Wasser

Formel Zeichen	Ein- heiten	Benennung
H ₂ SO ₄		Schwefelsäure
K		Kalium
L	[mol/l]	Löslichkeitsprodukt
Li ⁺		Lithium-Kation
Mg ²⁺		Magnesium-Kation
Na		Natrium
Na ⁺		Natrium-Kation
NH ₄ ⁺		Ammonium-Kation
NH ₄ CL		Ammoniumchlorid
NaOH		Natronlauge
O		Sauerstoff
SiO ₂		Aluminiumoxid (Kieselsäure)
SO ₄		Sulfat
a	[-]	Dissoziationsgrad
c	[g/l, mg/l]	Konzentration in einer Lösung
k	[mol/l]	Dissoziationskonstante

Verwendete Symbole, Formelzeichen und Einheiten

A	[-]	Calcium-Ausspülrate nach Strobl
A*	[-]	Calcium-Ausspülrate in Abhängigkeit von Dichtwandmasse und k-Wert
E _r	[V/m]	relative Dielektrizitätskonstante
F	[N]	Coulombsche Anziehungskraft
F _A	[cm ²]	durchströmte Fläche der BZS-Proben
M	[%]	Massenanteil
K	[-]	spez. Durchlässigkeitsbeiwert
S	[-]	Sättigungszahl
S _r	[-]	Sättigungszahl nach bodenmechanischer Definition
T	[°C]	Temperatur
V	[m ³ , cm ³]	Volumen

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheiten</u>	<u>Benennung</u>
v_a	[%]	Aushubverluste
v_b	[%]	Suspensionsverluste
v_e	[%]	Eindringverluste
v_f	[%]	Filtratwasserverluste
$v_{f'}$	[%]	Filtratwasserverluste nach Aushub der Lamellen
$v_{\ddot{u}}$	[%]	Verluste durch Überschneidung der Lamellen
v_{soll}	[m ³]	Sollmenge eingebauter Suspension
v_{ist}	[m ³]	Istmenge eingebauter Suspension
w/z	[-]	Wasser/Zement-Faktor
w_R/z	[-]	reduzierter Wasserzementfaktor
a	[-]	Teilchenabstände des Bentonits
c	[-]	Erosionskonstante
c_u	[kN/m ²]	undrainierte Scherfestigkeit
d	[m]	Dicke der Dichtwand
d_{10}	[mm]	maßgebende Korngröße des Bodens bei einem Siebdurchgang von 10 %
d_{Ca}	[-*]	Dicke des Ca-Bentonitteilchens
d_{Na}	[-*]	Dicke des Na-Bentonitteilchens
e	[-]	Porenzahl
e_1, e_2, e^*	[C]	entgegengesetzte Ionenladungen
e_t	[-]	Porenzahl nach vollständiger Hydratation
f	[cm ³]	Filtratwasserabgabe
f_M	[-]	Mehrverbrauch an eingebauter Suspension in die Lamelle
f_{so}	[kN/m ³]	Druckgefälle
h	[m]	hydraulische Druckhöhe
i	[-]	hydraulisches Gefälle
i_{grenz}	[-]	Grenzgradient
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
m	[g]	Masse

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Benennung</u>
m_d	[g]	Trockenmasse
n	[-]	
n^*	[-]	Porenanteil der BZS nach vollständiger Hydratation
Δp	[kN/m ²]	Druckdifferenz längs der Eindringtiefe
q_u	kN/m ²	einaxiale Druckfestigkeit
r	[μ m]	Abstand der Ionenmittelpunkte
r_c	[-]	materialabhängiger Reduktionsfaktor für Ca-Ausspülraten bei BZS
s	[m]	Eindringtiefe der Suspension
t	[a]	Versuchsdauer Jahre
	[d]	Tage
t_a	[h, min]	Aushubzeit
t_e	[h]	Erstarrungsende
t_M	[s]	Auslaufzeit aus dem Marshtrichter
v_{md}	[cm ³]	Volumen aus Bentonit und Zement vor der Hydratation
w	[-], [%]	Wassergehalt
z_s	[%]	Sandeintrag
γ	[kN/m ³]	Wichte
η	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität
ρ	[g/cm ³]	Dichte
ρ_F	[t/m ³]	Dichte der BZS im frischen Zustand
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_B	[g/cm ³]	Korndichte Bentonit
ρ_Z	[g/cm ³]	Korndichte Zement
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
τ_F	[N/m ²]	Fließgrenze

1 Einleitung und Problemstellung

Zur senkrechten Abdichtung tiefer Baugruben, Mülldeponien und Altlasten gegen Grundwasser werden oft Dichtungsschlitzwände eingesetzt. Dichtungsmaterialien sind hierbei Bentonit-Zement-Suspensionen, die während des Schlitzaustrahes die Erdwände stützen und dann aushärten.

Dichtungswände als Umschließungswände von Mülldeponien und Altlasten müssen den Abdichtungserfolg auf Dauer gewährleisten. Hier wird häufig die Lebensdauer der gesamten Baumaßnahme von der Qualität der Abdichtung bestimmt. Dies gilt sowohl hinsichtlich des Herstellungsverfahrens, wie auch der Qualität des eingebauten Dichtungsmaterials.

Es stellt sich dabei immer wieder die Frage, ob Aufbereitung, Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften der verwendeten Dichtwandmassen (DWM) auf die spätere Qualität der Wand übertragen werden können und welche Gesetzmäßigkeiten dabei zu berücksichtigen sind. Die in den Boden eingebrachte Dichtungs- masse muß im frischen, erhärtenden und ausgehärteten Zustand den Anforderungen nach Verarbeitbarkeit, Stützwirkung, Stabilität, Festigkeit und geringer Durchlässigkeit genügen.

Bislang wurden nur für die spezifischen Anforderungen einzelner Bauverfahren geeignete Bentonit-Zement-Suspensionen entwickelt. Voraussetzungen für eine routinemäßige Anwendung dieses Dichtungsverfahrens sind jedoch, daß Kenntnisse über Einbau, Verhalten und Eigenschaften einer solchen Dichtwandmasse vorliegen. Dies gilt insbesondere für das chemisch-physikalische Zusammenwirken von Bentonit und Zement.

2 Bisherige Untersuchungen

Dichtungswände zur Abdichtung von Baugruben gegen Grundwasser werden seit 1950 (Caron, 1972) verwendet.

Die Dichtwandmassen wurden zunächst im Zweimassen- und dann im Einmassenverfahren eingesetzt. Bei der Herstellung einer Dichtungswand im Zweimassenverfahren werden die Schlitzte im Schutz einer Bentonitsuspension abgeteuft und die Bentonitsuspension im Kontraktorverfahren durch eine Bentonit-Zement-Suspension verdrängt. Im Einphasenverfahren werden die Schlitzte mit einer Bentonit-Zement-Suspension abgeteuft, die nach Aushubende im Schlitz aushärtet und abdichtet.

2.1 Eigenschaften von frischen Bentonit-Zement-Suspensionen

Über die Entwicklung und Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen berichten Caron (1972), Carl und Strobl (1976), Döscher (1977) sowie Meseck, Ruppert, Simons (1979). Alle Autoren gehen davon aus, daß die Anforderungen an die Eigenschaften der Bentonit-Zement-Suspensionen bezüglich der Stützwirkung in etwa den Anforderungen an Bentonit-Suspensionen während der Herstellung der Schlitzwand entsprechen müssen. Im einzelnen werden genannt:

1. Die Bentonit-Zement-Suspension muß stabil sein, d.h. sie darf sich nicht entmischen.
2. Sie muß wie die herkömmlichen Bentonitsuspensionen die Erdwände stützen.
3. Die Viskosität der Bentonit-Zement-Suspension muß so gering sein, daß die Suspension pumpfähig ist und möglichst schnell aus dem Greifer abfließt (Meseck, 1981).

Caron berichtet über Meßmethoden und das rheologische Verhalten von Bentonit-Zement-Suspensionen. Die Messungen ergaben, daß das Verhältnis Bentonit zu Wasser einen Einfluß auf die Viskosität und die Zugabe von Zement sowohl eine "Verdickung" wie auch "Verflüssigung" der Suspension zur Folge hat. Die zeitliche Veränderung der Viskosität wurde mit der Auslaufzeit aus dem Marshtrichter gemessen (Bild 1).

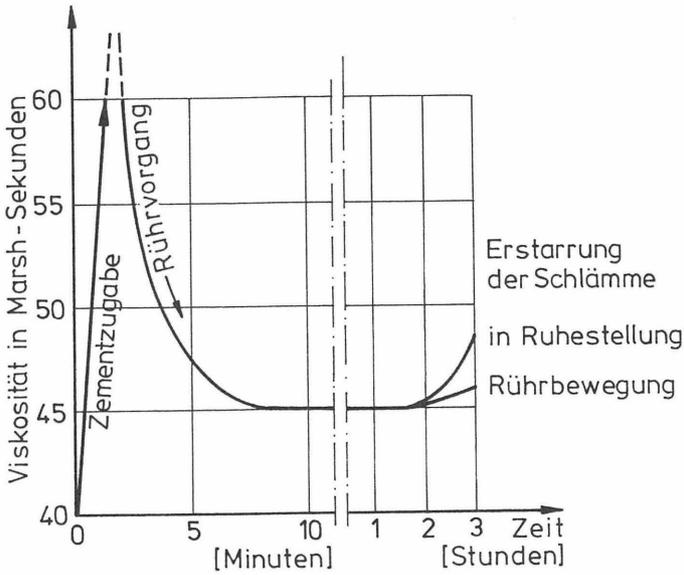


Bild 1: Entwicklung der Viskosität einer Bentonit-Zement-Schlämme (Caron, 1972)

4. Die Bentonit-Zement-Suspension darf nicht vor Beendigung des Schlitzauhubes erstarren. Sie muß über 15 Stunden verarbeitbar sein (Caron, 1972).

2.2 Erhärtung von Bentonit-Zement-Suspensionen

Da die Dichtwandmasse über mehrere Stunden in der Mischanlage, in der Pumpleitung und während der Aushubarbeiten im Schlitz bewegt wird, liegen Untersuchungen zur Abhängigkeit der Viskosität von der Rührzeit vor, z.B. (Meseck, 1981). Demnach steigt die Viskosität mit der Rührzeit an, was aus Bild 2 zu ersehen ist.

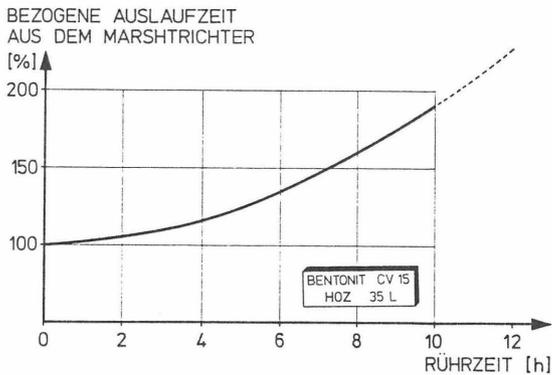


Bild 2: Viskosität (Auslaufzeit aus dem Marshtrichter) von Dichtwandmassen in Abhängigkeit von der Rührzeit (Meseck, 1981)

Der Hydratationsvorgang des Zementes beginnt erst nach mehreren Stunden. Die Bewegung der Dichtwandmasse während des Aushubs darf auf die Erhärtung des Zementes keine schädigende Wirkung haben (Döscher, 1977). Während die Rührzeit auf die Festigkeit der Mischungen mit Hochofenzementen keinen negativen Einfluß hatte, zeigten Mischungen mit Portlandzementen (Bild 3) nach längerer Rührzeit einen deutlichen Festigkeitsverlust.

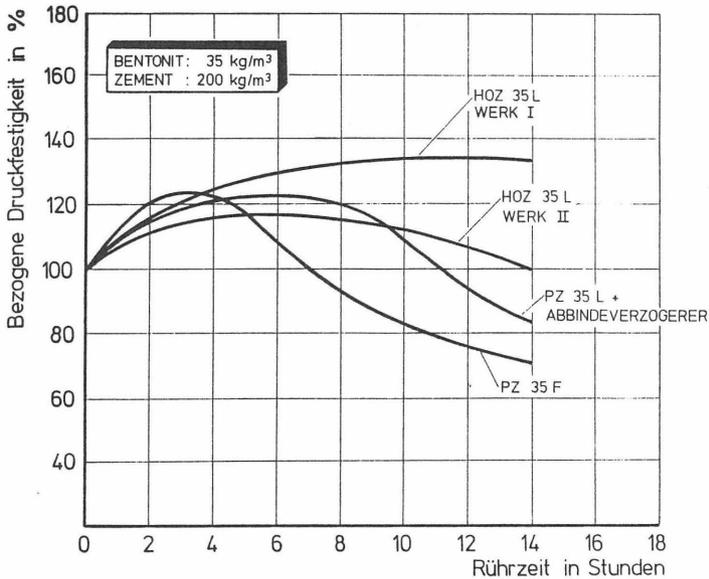


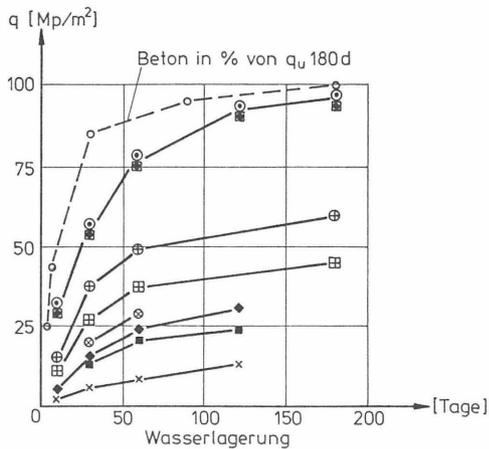
Bild 3: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Rührzeit. Die bezogene Druckfestigkeit nach 0 Stunden Rührzeit entspricht 100 % (Geil, Meseck, 1982)

2.3 Festigkeit, Durchlässigkeit und Erosionssicherheit von Dichtwandmassen

Im erhärteten Zustand sollte die Dichtwandmasse annähernd die gleiche Festigkeit wie das umgebende Bodenmaterial haben (Carl, Strobl, 1976) und eine geringe Wasserdurchlässigkeit (Simons, Meseck, Ruppert, 1979) aufweisen.

Zu fordern ist ferner die Erosionssicherheit der Dichtungswand. Anhand von Labor- und Feldversuchsergebnissen wird von Carl und Strobl (1976) für Dichtungswandmaterial aus Bentonit-Zement-Suspensionen mit Sandzugabe der Zusammenhang zwischen Erosionssicherheit, Wassergehalt und Zylinderdruckfestigkeit aufgezeigt.

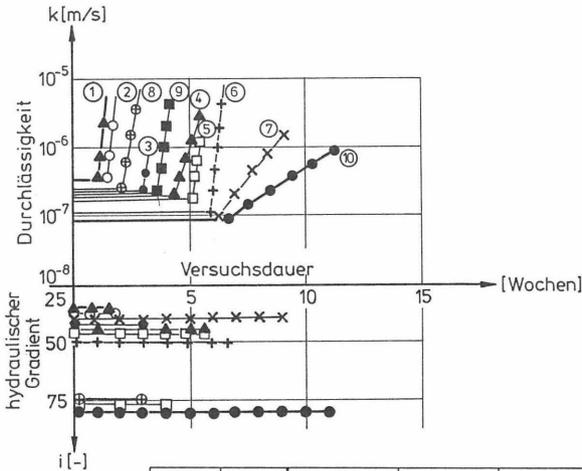
Die Messungen ergaben, daß die Verwendung von Hochofenzement gegenüber Portlandzement Festigkeitssteigerungen bis zu 100 % brachten und Probekörper aus Bentonit-Zement-Suspensionen bei einem Wasserzementwert von 3,3 bis 5,0 erst nach 60 Tagen Wasserlagerung ca. 80 % der Endfestigkeiten erreichten (Bild 4). Durch Zugabe von Sand oder Steinmehl bzw. durch eine Erhöhung des Zementanteils verringerte sich die Durchlässigkeit bei einem Wassergehalt von $w = 100\%$ auf $k = 2,1 \cdot 10^{-8}$ m/s.



Symbole	Zement in kg/m ³ Wasser	Bentonit in kg/m ³ Wasser	W/Z	Bentonit Wasser	w [%]
x—x	200	50	5,0	0,25	330
◆—◆	250	50	4,0	0,20	260
⊗—⊗	200	60	5,0	0,30	278
⊕—⊕	250	60	4,0	0,24	257
○—○	300	60	3,3	0,20	216
■—■	200	70	5,0	0,35	305
▣—▣	250	70	4,0	0,28	260
▤—▤	300	70	3,3	0,23	214

Bild 4: Zylinderdruckfestigkeit einer Bentonit-Zement-Suspension in Abhängigkeit der Wasserlagerungsdauer (Carl, Strobl, 1976)

Erhärtete Probekörper aus Bentonit-Zement-Sand-Mischungen (Bild 5) wurden bis zu 11 Wochen mit Leitungswasser bei hydraulischen Gradienten zwischen $i = 40$ und 80 durchströmt. Während der Durchströmung wurde ständig Calcium ausgespült, wodurch Proben mit Zylinderdruckfestigkeiten kleiner gleich 250 kN/m^2 aufweichten. Diese Ergebnisse unter Einbeziehung eines Feldversuches führten zu der Schlußfolgerung, daß Dichtungswandmaterialien erosionssicher sind, wenn die Zylinderdruckfestigkeit mindestens 350 kN/m^2 beträgt und der hydraulische Gradient bei zweifacher Sicherheit $i = 30$ nicht überschreitet.



Probennummer	Symbole	Zement [kg] pro m^3 Wasser	Sandgehalt in Gew.-%	Wassergehalt in [%]	q_u [Mp/m^2]	Wasserslagerung [Tage]
①	▲—▲	PZ 200	0	324	2,4	30
②	○—○	PZ 200	0	328	2,4	30
③	●—●	HOZ 250	0	146	20,0	90
④	▲—▲	HOZ 250	0	146	20,0	90
⑤	□—□	HOZ 250	0	146	20,0	90
⑥	+—+	HOZ 200	15	125	5,0	30
⑦	x—x	HOZ 250	15	183	11,0	30
⑧	⊕—⊕	HOZ 250	30	128	25,0	90
⑨	■—■	HOZ 250	30	128	25,0	90
⑩	●—●	HOZ 250	30	127	25,0	90

Bentonitgehalt bei Proben 1-10: 50 kg pro m^3 Wasser

Bild 5: Ergebnisse der Laborversuche zur Überprüfung der Erosionssicherheit verschiedener Dichtungswandproben (Carl, Strobl, 1976)

An der Grenzfläche Wand zu Boden muß vermieden werden, daß einzelne Partikel aus der Dichtwand beim Durchströmen gelöst werden und es nach und nach bei dieser Kontakterosion zu einer vollständigen Zerstörung der Wand kommt. Nach Simons, Meseck, Ruppert (1979) ist dies weniger eine Frage der Festigkeit der Dichtwandmasse als vielmehr eine Frage der Filterstabilität zwischen Dichtwand und angrenzendem Boden.

Bei der Herstellung werden Bodenteilchen mit in die Suspension eingetragen (Caron, 1972). Die Erhöhung des Sandgehaltes in der Dichtwandmasse kann zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit führen (Simons, Meseck, Ruppert, 1979) (Bild 6).

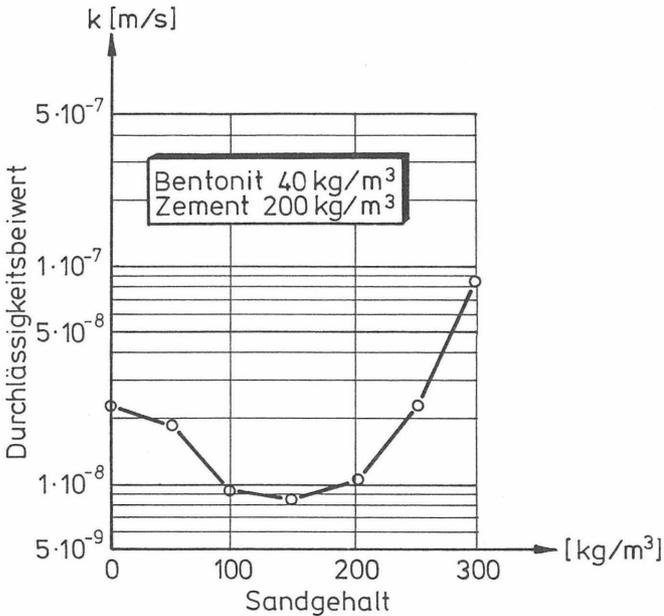


Bild 6: Wasserdurchlässigkeit der Dichtwandmasse in Abhängigkeit vom Sandgehalt (Simons, Meseck, Ruppert, 1979)

2.4 Chemische Beständigkeit

Beim Einsatz zur Abdichtung von Mülldeponien und Altlasten gilt die Forderung:

Die Dichtwandmassen müssen gegen die angreifenden Wässer resistent sein.

Der Angriff bzw. Eintrag von Kontaminationen soll durch undurchlässige Dichtwandmassen vermieden werden.

Detaillierte Anforderungen an die Undurchlässigkeit von Dichtwandmassen für vertikale Abdichtungen speziell für Mülldeponien in Form von Richtlinien und Normen gab es zu Beginn der Untersuchungen noch nicht. Häufig wird ein Durchlässigkeitsbeiwert $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s und eine Mindestdicke der Dichtung von 0,6 m gefordert. Dichtungswände werden üblicherweise in dieser Stärke ausgeführt. Durch den in Laborversuchen festzulegenden Durchlässigkeitsbeiwert soll die Wassermenge begrenzt werden, die die Dichtungswand durchströmen darf. Bei der Durchströmung wird Calciumhydroxid aus der zementhaltigen Dichtwand ausgewaschen (Strobl, 1976 und 1983). Ein Effekt, der sich im Falle der Durchströmung mit elektrolythaltigen Sickerwässern noch verstärkt (Weiß, 1981, Geil 1982).

Unter Widerstandsfähigkeit von Dichtwandmassen ist auch die Einhaltung einer erforderlichen Mindestfestigkeit zu verstehen. Tritt bei Dichtwandmassen eine Reduzierung der Druckfestigkeit ein, so kann dies zu drei Arten des Versagens führen:

- a) Die Filterstabilität gegen grobe Bodenschichten ist nicht gewährleistet. Feinanteile werden ausgespült.
- b) Die Auswaschung von Teilchen aus der Dichtwandmasse führt zu einem größeren Porenvolumen. Die Durchlässigkeit nimmt zu und damit auch die Wassermenge, die pro Zeiteinheit die Auswaschung bewirkt.

- c) Das Feststoffgerüst ist nicht in der Lage, den anstehenden Erddruck aufzunehmen und zerbricht. Die Feststoffe konsolidieren unter Volumenminderung.

Die Filterstabilität von Dichtwandmassen läßt sich nach Karstedt, Ruppert (1982) über die Zugfestigkeit bestimmen.

Weiß gibt ein qualitatives Merkmal für die Mindestfestigkeit an. Danach versagt die Dichtwand, wenn: *"die Druckfestigkeit so niedrig wird, daß das Feststoffgerüst unter dem Erddruck zerbricht und die verbleibenden Feststoffe auf etwa 10 % des ursprünglichen Volumens konsolidieren"*. Weiss versucht, die Korrosionsvorgänge bei Dichtwandmassen in eine Formel zu fassen, mit der die Lebensdauer von Dichtwänden berechnet werden kann (Bild 7).

Unter der Annahme, daß das im Zement der Dichtungswand vorhandene Calciumoxid (CaO) durch den Angriff von Kohlendioxid (CO_2), Ammonium (NH_4^+) und Magnesium (Mg^{2+}) in lösliche Verbindungen umgewandelt und anschließend ausgewaschen wird, lagerte Weiß Dichtwandmassen z.B. in Salzsäure und untersuchte den CaO -Verlust in der Dichtwandmasse sowie deren Volumenabnahme. Die Versuche ergaben, daß bei einem CaO -Verlust von 20 % die Volumenabnahme der Dichtwandmasse unter 15 % blieb und der Abfall der einaxialen Druckfestigkeit maximal 50 % betrug. Aus diesem Grunde seien bis zu einem CaO -Verlust von 20 % die Anforderungen an die Eigenschaften der Dichtwand noch erfüllt.

Nach Weiß (1981) errechnet sich die Lebensdauer einer Dichtwand von 0,60 m Dicke bei einem Zementgehalt von 160 kg/m^3 zu $t = 8,8$ Jahren für eine nach DIN 4030 auf Beton nur schwach aggressiv wirkende Magnesiumkonzentration und einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ (Berechnung nach Weiß, 1981) .

Formel nach Weiss

$$t = p [0,63 - s(0,63 - \gamma)] \frac{d^2 \cdot z}{k \cdot h(0,64c + 1,55n + 2,31m)}$$

t = Lebensdauer der Dichtwand [sec]

p = Anteil des ausgespülten CaO ($p \leq 0,2$)

0,63 = Massenanteil an CaO bei üblichen Portlandzement

s = Massenanteil an Hochofenschlacke im verwendeten Zement

γ = Massenanteil an CaO in der Hochofenschlacke

d = Dicke der Dichtwand in m

z = Zementanteil der Dichtwandmasse in kg/m^3

k = Durchlässigkeitskoeffizient nach Darcy [m/s]

h = Wasserspiegeldifferenz vor und hinter der Dichtwand

c = Konzentration an kalklösender Kohlensäure CO_2 in kg/m^3

n = Konzentration an Ammonium NH_4 in kg/m^3

m = Konzentration an Magnesium Mg in kg/m^3

Bild 7: Abschätzung der Lebensdauer einer Dichtwand unter Berücksichtigung der betonaggressiven Stoffe entsprechend DIN 4030 (Weiß 1981)

Caron berücksichtigte bei Beständigkeitsversuchen an Dichtwandmassen den Einfluß des Bentonits. Die Versuche ergaben, daß der Festigkeitsverlust der in sehr weichem Wasser und in magnesiumsulfat-haltigen Wässern gelagerten Dichtwandmassen um so geringer ausfiel, je größer der W/Z-Faktor und der Bentonitgehalt waren. Daraus folgert Caron, daß Bentonit-Zement-Proben gegenüber aggressiven Wässern beständiger als reiner Zement seien.

Die Beständigkeitsversuche von Caron und Weiss bestanden aus Festigkeitsuntersuchungen an in elektrolythaltigen Wässern gelagerten Proben.

Strobl stellte 1982 ein Verfahren vor, mit dem zur Ermittlung der chemischen Erosionssicherheit, d.h. Begrenzung der Ausspülrate an Calciumhydroxid aus Dichtwandmassen unter 30 % der vorhandenen Calciummenge, ein zulässiger Grenzgradient errechnet wird. Dichtwandmassen wurden bis zu 6 Jahren mit Leitungswasser bei unterschiedlichen Gradienten durchströmt, wobei der Grenzgradient von der Zusammensetzung der Dichtwandmasse abhängig war (Bild 8). Die Erosionskonstante c kann nach den Untersuchungen von Strobl in einem 6 Monate dauernden Durchströmungsversuch bestimmt werden. Der Grenzgradient i_{grenz} , bei dem eine Zerstörung der Masse gerade noch vermieden wird, errechnet sich zu

$$i_{\text{grenz}} = \sqrt{\frac{0,3}{c}} \quad (\text{Gl. 1})$$

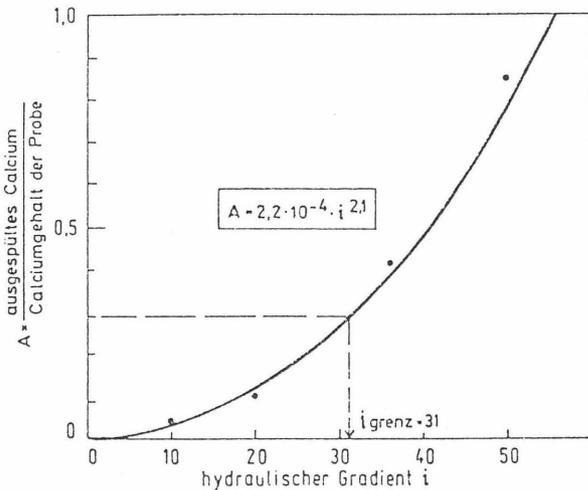


Bild 8: Ausspülung von Calcium in Abhängigkeit des hydraulischen Gradienten (Strobl, 1982)

Alle vorgestellten Prüfungen und Meßmethoden wurden an Dichtwandmassen durchgeführt, die für die Abdichtung bei Baugruben und im Staudambau eingesetzt wurden.

Die Prüfung der Durchlässigkeit von Dichtwandmassen für die Abdichtung einer Altlast gegen Grundwasser ergab, daß sich die Durchlässigkeit in dem betrachteten Zeitraum von 7 Monaten bei der Durchströmung mit sehr stark betonaggressiven Sickerwässern stark verringerte (Bild 9).

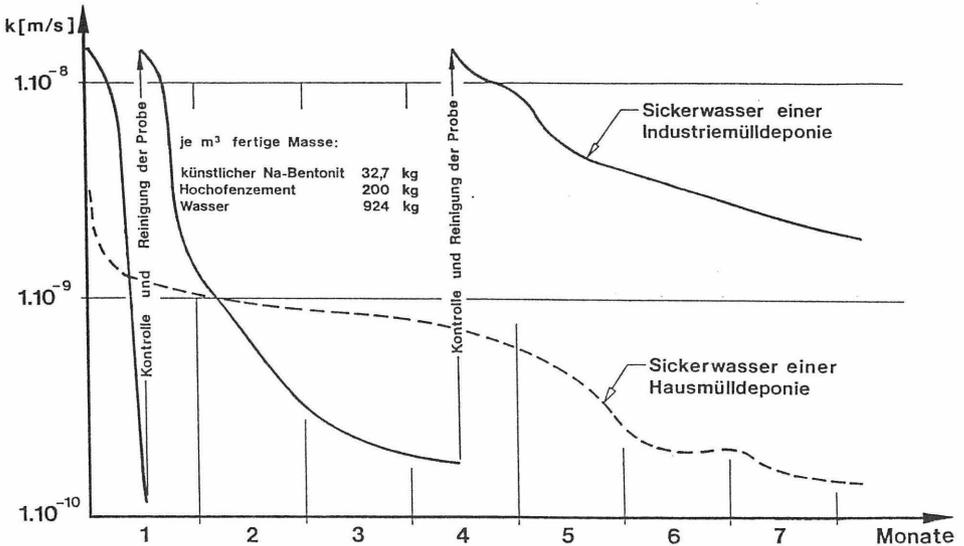


Bild 9: Langzeit-Durchlässigkeitsversuche mit Sickerwässern (Simons, Hänsel, Meseck, 1981)

2.5 Zusammensetzung von Dichtwandmassen

Die hier betrachteten Dichtwandmassen aus vorliegenden Ergebnissen und Berichten über ausgeführte Baumaßnahmen und Laboruntersuchungen bestanden aus

20 - 40 kg Natriumbentonit
150 - 300 kg Zement
887 - 943 kg Wasser pro m³

Für den jeweiligen Zweck wurden unterschiedliche Massen entwickelt.

Dabei verändern in der Dichtwandmasse

- unterschiedliche Bentonitgehalte die Viskosität,
- unterschiedliche Zemente Festigkeit und Durchlässigkeit,
- sowohl Bentonit wie auch Zement die Beständigkeit gegen elektrolythaltige Wässer.

Festzustellen ist, daß weder systematische Untersuchungen von Dichtwandmassen vorliegen noch allgemeingültige bzw. vergleichbare Prüfverfahren und -methoden vorhanden sind.

Bereits 1972 hat Caron darauf aufmerksam gemacht, daß der Natriumbentonit bei der Zugabe von Zement durch das leicht lösliche Calciumhydroxid in den weniger wasserbindenden Calciumbentonit umgewandelt wird. In verschiedenen Veröffentlichungen wurde angedeutet, daß Natrium im Bentonit besser austauschbar ist als Calcium. Es galt deshalb zu untersuchen, ob Dichtwandmassen mit Ca-Bentoniten

- o herstellbar,
- o aufgrund ihres geringeren Wasserbindevermögens und ihrer niedrigen Viskosität in größeren Mengen einsetzbar und
- o chemisch resistenter als Na-Bentonit-Zement-Mischungen sind.

In den Bildern 10 und 11 sind die aus der Literatur bekannten Untersuchungsmethoden der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Dichtwandmassen wiedergegeben.

physikalische Eigenschaften	Kennzeichnung	Parameter	Formelzeichen	Versuchsgerät	Versuchsdurchführung
Zusammensetzung	Feststoffgehalt	Dichte der stützenden Flüssigkeit	ρ_F [t/m ³]	Hydrometer Spüluwage	Literatur, Stand der Technik
Stabilität	Zustand des Dispersionskolloides Verhinderung der Sedimentation Keine Trennung der flüssigen und festen Phase drucklos	Absetzmaß		Standzylinder	Bestimmung der abgeklärten Wassermenge auf der erstarrten Suspension in % der Einfüllmenge nach 24 Stunden Standzeit
	unter Druck stehender BZS	Filtratwasserabgabe	f [cm ³]	Filterpresse	DIN 4127
Stützwirkung	Scherfestigkeit der BZS Eindringverhalten in den Boden	Fließgrenze	τ_F [N/m ²]	Pendelgerät Kugelharfe	DIN 4127
Viskosität	Fließeigenschaften Kennwert für die komplexen Eigenschaften aus Dichte, Viskosität und Scherfestigkeit	Auslaufzeit aus dem Marshtrichter	t_M [s]	Marshtrichter	Auslaufzeit vom 1000 cm ³ BZS aus dem Marshtrichter (Füllinhalt 1500 cm ³)
Verarbeitbarkeit	Fließeigenschaften bei Rührbewegungen				Rührzeit 6 bis 12 Stunden Rührinter- 5 Minuten vall Rühren 15 Minuten Pause
Sandgehalt	Eintragung von Bodenteilchen	Sandgehalt		Vol.-%	API-Gerät Trennung des Sandgehaltes durch Absieben Korngröße > 0,063 mm

Bild 10: Physikalische Parameter von Dichtwandmassen im frischen Zustand und angewandte Versuchstechnik

physikalische Eigenschaften	Kennzeichnung	Parameter	Formelzeichen	Versuchsgerät	Versuchsdurchführung
Festigkeit	Erhärtung der BZS	einaxiale Druckfestigkeit	q_u [kN/m ²]	Prüfpresse DIN 51 223	Proben hld = 10/10 [cm] Vortriebsgeschw. 1,25 mm/min
Durchlässigkeit	Wasserdurchlässigkeit von Darcy	Durchlässigkeitsbeiwert	k [m/s]		Triaxialzellen DIN 18 130
Erosionssicherheit + Chemische Eigenschaften Chemische Beständigkeit	Festigkeitsverlust bei Durchströmung mit weichem Wasser als Funktion der Zeit und hydraulischem Gradient Eluierbarkeit von Calcium, dadurch Reduzierbarkeit der Festigkeit, Erhöhung der Durchlässigkeit	Druckfestigkeit Wassergehalt Durchlässigkeit Ausspülrate an Calcium	q_u [kN/m ²] w [-] k [m/s] $A = \frac{Ca^{++}(\text{ausgespült})}{Ca^{++}(\text{vorhanden})}$ k [m/s]	DIN 18 121 DIN 18 130	Bestimmung der ausgespülten und in die BZS eingetragene und vorhandene Ca ⁺⁺ -Menge Lagerung in Prüf Flüssigkeit Durchströmung mit Prüf- flüssigkeit

Bild 11: Physikalische und chemische Parameter von erhärteten Dichtwandmassen und angewandte Versuchstechnik

3 Ziele der eigenen Arbeit

Aufgrund der geschilderten Unsicherheiten und offenen Fragen im Bauverfahren Dichtungsschlitzwände mit Bentonit-Zement-Suspensionen werden physikalische Eigenschaften von frischen Suspensionen und abgebundener Dichtwandmasse erforscht. Dabei sollte die Wechselwirkung zwischen Bentonitsorte und -menge und Zement-sorte und -menge sowie ihre gegenseitige Beeinflussung untersucht werden. Aus den vorausgehenden Auswertungen sind Untersuchungen bei Bentonit-Zement-Suspensionen über

- Mischfähigkeit und Verarbeitbarkeit
- Viskosität, Fließgrenze und Filtration
- Stabilität und Stützwirkung

und bei Dichtwandmassen über

- Erstarrungsverhalten
- Druckfestigkeit
- Erosionssicherheit
- Dauerbeständigkeit und Langzeitverhalten

für eine Beurteilung der Dichtwandmasse und Bemessung der einsetzbaren Bentonite und Zemente notwendig. Da bisher einheitliche Meßmethoden fehlten, galt es,

- Empfehlungen zu Prüfmethode im Labor und Feld sowie
- Empfehlungen zum Einsatz von Dichtwandmassen

auszuarbeiten.

Um die genannten Untersuchungen umfassend und mit sinnvollen Randbedingungen planen und durchführen zu können, wurden zunächst Baustellenergebnisse ausgewertet und durch baubegleitende Labor-messungen ergänzt. Ziel dieser Untersuchungsphase war es, ein Anforderungsprofil für Bentonit-Zement-Suspensionen im Gebrauchszustand zu entwerfen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollten die physikalischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im Labor ermittelt und gezielte Untersuchungen zu Verarbeitbarkeit, Stabilität und Erstarrungsverhalten bei unterschiedlicher Materialzusammensetzung durchgeführt werden.

An ausgewählten Dichtwandmassen war sodann die zeitliche Entwicklung der Festigkeit und Durchlässigkeit zu verfolgen, um einen genaueren Zusammenhang beider Parameter in Abhängigkeit von Materialzusammensetzung und Dichtwirkung zu erfassen.

Anschließend sollten Meßmethoden zur Prüfung des Langzeitverhaltens entwickelt und Durchlässigkeitsversuche mit ausgewählten Prüfflüssigkeiten vorgenommen werden. Ziel war es, die Dauerhaftigkeit von Dichtwandmassen genauer als bisher zu erfassen und ein Bemessungsverfahren zu erarbeiten.

	<p>BESCHREIBUNG BENTONIT/ZEMENTSPEZIFISCHER KENNDATEN</p> <ul style="list-style-type: none">- Beschreibung der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit- und Zement in Bentonit-Zement-Suspensionen.Festlegung wichtiger bentonit/zementspezifischer Kenndaten
PHASE 1	<p>UNTERSUCHUNGEN AUF BAUSTELLEN</p> <ul style="list-style-type: none">- Messungen an Dichtwandmassen beim Einsatz mit baubegleitenden Laborversuchen- Ergebnisse zum Einfluß des Baubetriebs auf Bentonit-Zement-Suspensionen <p>ERSTELLUNG EINES ANFORDERUNGSPROFILS</p> <ul style="list-style-type: none">- Notwendige Prüfungen zur Untersuchung von Dichtwandmassen
PHASE 2	<p>LABORVERSUCHE</p> <ul style="list-style-type: none">- Ergebnisse zu Verarbeitung, Stabilität und Erstarrungsverhalten bei Variation von Bentonitart, -sorte und -konzentration sowie Zementsorte und -konzentration
PHASE 3	<p>AUSWAHL GEEIGNETER DICHTWANDMASSEN</p> <p>FESTIGKEITS- UND DURCHLÄSSIGKEITSVERSUCHE</p> <ul style="list-style-type: none">- Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Festigkeit und Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Probenalter- Ergebnisse zum Durchlässigkeitsverhalten und Festlegung von wichtigen bentonit/zementspezifischen Kenndaten
PHASE 4	<p>ERARBEITEN VON MESSMETHODEN ZUR PRÜFUNG DES LANGZEITVERHALTENS</p> <ul style="list-style-type: none">- Meßmethoden zum Zeitraffereffekt- Durchführung von Durchlässigkeitsversuchen mit ausgewählten Prüfflüssigkeiten- Ergebnisse der Dauerhaftigkeit und chemischen Erosionssicherheit

Bild 12: Darstellung der einzelnen Untersuchungsphasen

4 Anforderungen an Dichtungswände und Eigenschaften der einsetzbaren Materialien

4.1 Dichtungswände

Die Dichtungswände werden meist in einer Dicke von 0,60 oder 0,80 m Stärke abgeteuft. Je nach Kornzusammensetzung, Porosität und Filtrationsverhalten dringt die Frischsuspension in die anstehenden Bodenschichten ein, so daß die tatsächliche Dicke der Wand etwas stärker ist. Bei den weiteren Betrachtungen wird hier von der geplanten Dicke 0,60 oder 0,80 m gesprochen.

4.1.1 Einphasenverfahren

Dichtungswände werden im Einmassenverfahren und Zweimassenverfahren hergestellt, wobei hier nur Dichtwandmassen im Einmassenverfahren untersucht werden.

Der Schlitz wird im Schutz der frischen Dichtungsmasse ausgehoben. Die Dichtungsmasse aus Bentonit-Zement-Suspension stützt den Boden. Nach Beendigung des Aushubes verbleibt die Dichtungsmasse im Schlitz und härtet aus. Die Dichtungswand wird im Pilgerschrittverfahren erstellt, d.h. den zunächst erstellten Primärlamellen 1 und 3 folgen zeitversetzt die Sekundärlamellen 2 und 4, welche durch Überschneidung der Primärlamellen eine geschlossene Wand bilden.

Beim Aushub der Sekundärlamellen schneidet der Greifer um mindestens 30 cm in die relativ weiche Masse der Primärlamellen ein. Durch den noch nicht abgeschlossenen Hydratationsvorgang der Dichtungsmasse wird die frische Suspension in den Sekundärlamellen chemisch angebunden (Bild 13).

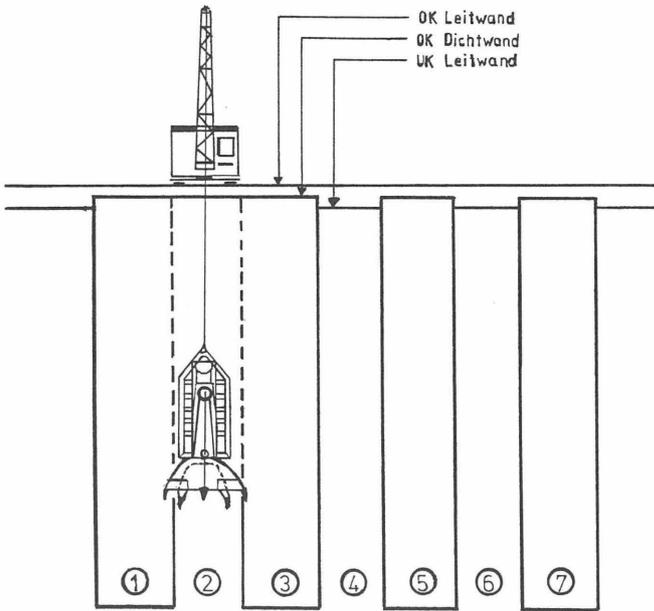


Bild 13: Herstellung von Dichtungsschlitzwänden im Einphasenverfahren

4.1.2 Kombinationsdichtungen

In die mit Suspension gefüllten Lamellen werden Stahlbohlen oder Kunststoffdichtungsbahnen gestellt, die dann in Kombination mit der Dichtwandmasse das eigentliche Dichtungselement bilden (Geil 1982, Jessberger 1986).

4.2 Dichtwandmassen

Die Dichtungsmassen unterscheiden sich nach zwei Hauptgruppen:

- Na-Bentonit-Zement-Suspensionen
- Ca-Bentonit-Zement-Suspensionen

Im frischen Zustand werden die Dichtungsmassen im folgenden Bentonit-Zement-Suspensionen (BZS), im erstarrten und aushärtenden Zustand Dichtwandmassen (DWM) genannt.

4.2.1 Herstellung und Einbau der Dichtungsmassen

Es wird zunächst eine Bentonit-Suspension aus Bentonit und Wasser gemischt, der nach ausreichender Quellzeit in einem zweiten Mischvorgang der Zement zugefügt wird. Übliche Konzentrationen von Na-Bentonit-Zement-Mischungen sind:

30 - 60 kg Na-Bentonit
150 - 200 kg Zement
900 - 940 kg Wasser

pro m³ Dichtungsmasse. Na-Bentonit-Zement-Suspensionen eignen sich vor allem bei Einphasenverfahren.

Für Abdichtungen ist eine feststoffreiche resistente Dichtungsmasse wünschenswert. Ca-Bentonite haben jedoch ein geringeres Wasserbindevermögen als Na-Bentonite. Dementsprechend ist die Konzentration von Ca-Bentonit in der Ca-Bentonit-Zement-Suspension wesentlich erhöht worden auf

175 - 250 kg Ca-Bentonit
150 - 200 kg Zement
850 - 900 kg Wasser pro m³ Dichtungsmasse.

Zu den zu berücksichtigenden Parametern bei der Planung einsetzbarer Bentonit-Zement-Suspensionen zählen die Aushubtiefe und Aushubzeit der Dichtungsmasse.

Wenn die Dichtungswand im Kombinationsverfahren gebaut wird, ist die Herstellung von der möglichen Verarbeitungszeit der Bentonit-Zement-Suspension abhängig.

Bei den Kombinationsverfahren wird aus Fertigungsgründen meist die kontinuierliche Schlitzwandbauweise angestrebt. Nach Aushubende muß die BZS noch geringe Scherfestigkeiten haben, damit die Stahlpundwände oder Folien problemlos einzubringen sind. Danach muß die BZS möglichst rasch erstarren, damit aus Standsicherheitsgründen die Länge des "offenen Schlitzes" nach DIN 4126 gering bleibt. Der nicht lineare Anstieg der Scherfestigkeit mit der Zeit ist somit ein weiteres Kriterium zur Dimensionierung der Aushubzeit und -leistung.

Anders als bei Schlitzwänden wird die mögliche Tiefe der Dichtungswand, zumindest wenn sie im Einphasenverfahren erstellt wird, durch die Eigenschaften der Dichtungsmasse mit bestimmt, die sich mit der Zeit verändern, da der Zement erhärtet.

BZS verändern von Beginn des Anmischens im Laufe des Untersuchungszeitraumes ihre Eigenschaften in der Weise, daß sie von einer Suspension, die aus dem Marshtrichter ausfließt, in eine "pasteuse Flüssigkeit" übergehen und allmählich einen mehr oder minder "festen Körper" bilden (Brauns, Witt 1983).

4.2.2 Verarbeitbarkeit

Untersuchungen am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (Meseck, 1981) ergaben, daß die einaxialen Druckfestigkeiten von bis zu 15 Stunden bewegten Dichtungsmassen nach 12 Stunden Rührzeiten wieder abnahmen. Daher sollten 12 Stunden Aushubzeiten pro Schlitz beim Einphasenverfahren nicht überschritten werden.

4.2.3 Einfluß der Verarbeitbarkeit auf die herstellbare Wandtiefe

An dieser Stelle werden Werte für Aushubleistungen für leichte Böden (Bodenklasse 3 nach DIN 18 300 - mittlerer Sand bis Feinkies) mit kleinen Hindernissen wiedergegeben, die auf Befragen einschlägiger Fachfirmen genannt wurden:

Tiefe	Aushubleistung *	Aushub Schlitzbreite 2,80 m Dicke 0,60 m	Dichtwand- massen
m	m ² /h	m ²	kg/m ³
0 - 10	20	28	Bentonit 30 - 35
10 - 20	15 - 20	56	Zement 200 - 250
20 - 30	12 - 15	84	
30 - 60	5 - 10	168	Bentonit 40 Zement 150

* unabhängig von der Wanddicke

Bild 14: Aushubleistungen und Dichtwandmassen in Abhängigkeit von der Tiefe (Bodenklasse 3, DIN 18 300)

Die Aushubzeit, in der ein Schlitz ausgehoben wird, errechnet sich zu

$$T = \frac{\text{Aushub}}{\text{Aushubleistung}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Aus den in Bild 14 dargestellten Aushubleistungen lassen sich die theoretische maximal und minimal möglichen Tiefen h_{\max} und h_{\min} errechnen, bei denen die Aushubzeit von 12 Stunden nicht überschritten wird.

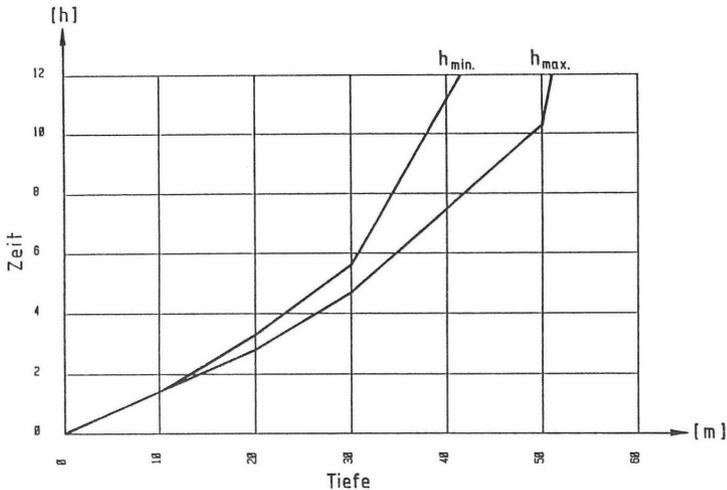


Bild 15: Abhängigkeit zwischen Aushubtiefe und Aushubzeit

5 Beschreibung der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Bentonit und Zement in Bentonit-Zement-Suspensionen

5.1 Bentonit

Bentonit ist ein natürlich vorkommender Ton, der zu 60 - 80 M.-% aus dem Mineral Montmorillonit besteht. Letzter bestimmt weitgehend die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bentonits, ein schichtweise gelagertes Aluminiumhydro-silikat (Hofmann, 1956).

Zwei Siliziumtetraederschichten schließen eine Aluminiumoktaederschicht symmetrisch ein und bilden eine Kristall-Lamelle. Im Kristallgitter des Montmorillonits sind einige Siliziumatome der Tetraederschicht durch Aluminiumatome und einige Aluminiumatome der Oktaederschicht durch Magnesiumatome ersetzt, was eine negative Überschußladung des Kristallgitters hervorruft. Daher hat der Kristall das Bestreben, Metallkationen wie z.B. Na^+ und Ca^{2+} elektrostatisch anzuziehen. Nach Freundlich (1932) werden die Kationen in wässriger Lösung hydratisiert, d.h. sie werden von Wasser umlagert. Die Zahl der eingelagerten Wassermoleküle kann zwischen Null und einigen hundert Molprozenten liegen (Möbius, 1976).

Beim Na-Bentonit beträgt das Wasseraufnahmevermögen 600 - 700 %, bei Ca-Bentonit jedoch nur 200 - 300 % (Schulze, Muhs, 1967). Die Wassereinlagerung in Form einer innerkristallinen Quellung ist reversibel. Wird Bentonit im Wasser suspendiert, so tritt der beschriebene Vorgang des innerkristallinen Quellens ein.

Montmorillonitkristalle sind bei großer Flächenausdehnung äußerst dünn. Die Flächen der Schichtlamellen haben eine negative Ladung, die Kanten sind positiv geladen. Die Teilchen bilden im Wasser ein großvolumiges Gerüst, in dem sich die Teilchen Kante auf Fläche stellen und somit ein Kartenhausgerüst (Hofmann, 1945) bilden. Das Ausmaß dieser Quellung wird bestimmt durch die unterschiedlichen Na- oder Ca-Kationen, die die Schichtpakete mittels

Coulomb'schen Anziehungskräften verbindet. Je nach Größe dieser Kräfte entstehen dickere oder dünnere Zwischenschichten. Die Quellfähigkeit der Na-Bentonite liegt bei maximal 14 μm , während die Ca-Bentonite bis auf 2 μm quellen.

Bentonit, feinverteilt im Wasser, soll den Zement in Schwebelage halten, damit er sich nicht absetzt. D.h. die Feststoffe dürfen nicht nach unten sedimentieren, damit der Suspensionszustand stabil bleibt. Der stabile Suspensionszustand wird, vor allem bei Verwendung von Na-Bentonit, durch die Zugabe von Zement und durch frühzeitig in die Dichtungswand eindringende elektrolythaltige Sickerwässer gefährdet.

Jasmund/Lange stellten fest, daß das weniger hydratisierte Ion von dem stärker zur Hydratation neigenden adsorbiert wird. D.h., das System ist bestrebt, den geringsten Energiezustand einzunehmen. Gregor (1948) formulierte diesen Vorgang thermodynamisch. Montmorillonit ist mit einem stark hydratisierten Kation beladen. Es steht im gequollenen Zustand unter erheblicher Spannung - dem Quelldruck - und hat einen hohen Energiegehalt. Zur Entspannung kommt es, wenn dem Austauscher ein weniger stark hydratisiertes Kation angeboten wird, das in dem Austauscher weniger Platz beansprucht. Mit dem hinausdiffundierenden Kation wandert auch überschüssiges Hydratwasser aus. Auf diese Weise geht die Quellung des Schichtpaketes zurück.

Sind nun die Kationen kleiner als das hydratisierte Natrium; kommt es zu einem Austausch mit dem Natriumionen, führt dies zu einer Volumenminderung. Die Abstände zwischen den Mineralteilchen verringern sich und die Coulomb'schen Anziehungskräfte erhöhen sich. Die zuvor dispergierten Teile schließen sich wieder zusammen, das Hydratwasser entweicht aus den Zwischenschichten, die Dichte der Teilchen steigt und die Suspension entmischt sich. Diese Gefahr besteht verstärkt bei Na-Bentoniten, da durch die Zugabe von Zement unhydratisiertes Calcium in die gequollene Bentonitsuspension gelangt.

Die dichtende Wirkung des Bentonits ist auf die erwähnte Quellung zurückzuführen (Bild 16, Krenkler).

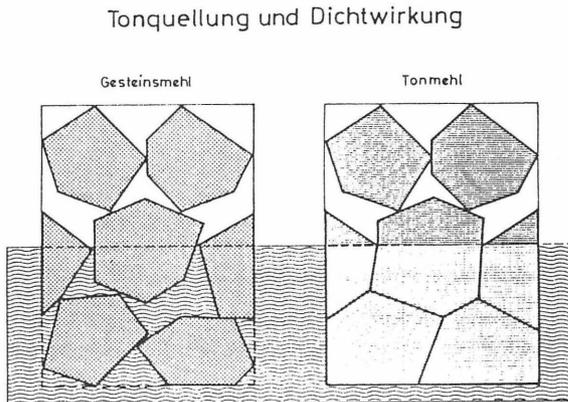


Bild 16: Dichtwirkung des Bentonits (Krenkler, 1980)

Neben der Wasseraufnahmefähigkeit der Bentonite ist bei Bentonit-suspensionen die Thixotropie von Bedeutung. Thixotropie wird hier als mechanische, reversible Sol-Gelumwandlung verstanden (Lottermoser, 1948). Die Bentonitsuspension erstarrt im Ruhezustand zu einem Hydrogel, das sich jedoch bei Bewegung (Greifer bei Aushub der Lamellen) in die flüssige Solphase zurückverwandelt.

5.1.1 Bentonitsorten

Es gibt auf dem europäischen Markt eine Reihe von Bentonitsorten, die aus aktivierten Calcium-Bentoniten (Na-Bentoniten) bestehen; sie wurden zunächst für Schlitzwandbauweisen entwickelt. Durch die Aktivierung wird der im Rohbentonit vorliegende Calcium-Montmorillonit durch Basenaustausch in den Natrium-Montmorillonit umgewandelt. In der Bundesrepublik Deutschland werden vornehmlich aktivierte Calcium-Bentonite für den Aushub von Schlitzwänden angeboten. Bei Einführung der Dichtwände aus Bentonit-Zement-Suspensionen wurden zunächst die gleichen Bentonite eingesetzt, es zeigte sich aber, daß diese nicht ausreichend zementstabil waren. Aus diesem Grunde werden aktivierte Calcium-Bentonite hauptsächlich aus dem Mittelmeerraum eingesetzt, die zementstabil sind. Daneben gibt es natürlich vorkommende Natriumbentonite aus den Vereinigten Staaten. Für Dichtwandmassen im europäischen Raum werden derzeit 5 aktivierte Ca-Bentonitsorten angeboten, von denen 4 für die eigenen Untersuchungen ausgewählt wurden (Bentonit A, B, C und D).

Die Hersteller von Bau-Bentoniten geben den Na-Bentoniten Pufferstoffe zu, um sogenannte zementstabile Produkte zu erhalten. Über Art und Funktionsweise dieser Pufferstoffe liegen keine Informationen vor, so daß eine Beurteilung der Beständigkeit gegenüber einer "Inaktivierung" der Na-Bentonite durch Zement schwierig ist.

Bentonit ist ein natürliches Produkt, das je nach Charge gewissen Schwankungen der physikalischen Eigenschaften in Bentonitsuspensionen unterliegt. Es ist deshalb wichtig aber auch schwierig, die Eignung beschreibende Kennwerte und ihre zulässige Streubreite für zementstabile Bentonite festzulegen.

Untersuchungen mit Salzkonzentrationen ergaben, daß diese Bentonitsorten gegenüber Elektrolyten wesentlich unempfindlicher sind als ungepufferte Bentonite, die in der Schlitzwandtechnologie für reine Bentonitsuspensionen eingesetzt werden. Die Ergebnisse von Braune, Richter (1949), wonach die rheologischen Meßwerte bei steigender Salzkonzentration ein Maximum durchlaufen und dann rasch abfallen, konnten von Möbius, Walther und Günter 1976 an einem ungepufferten und in eigenen Versuchen an den Bentonitsorten C und D bestätigt werden (Bild 17 und 18). Mit steigenden Haltekräften der einwertigen Kationen $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}$ und zweiwertigen Kationen $\text{Mg}^{++} < \text{Ca}^{++} < \text{Ba}^{++}$ wird die Blättchenstruktur des Bentonits in der Suspension zunehmend rückgängig gemacht. Es entstehen grobere Montmorillonitkristalle, die die Filtratwassermengen erhöhen. Die Bilder 19 und 20 geben einen Überblick über die chemische Beständigkeit und Zementstabilität der hier untersuchten Bentonite. Die Fließgrenzenwerte fielen in dem betrachteten Zeitraum von 24 Stunden ab während die Filtratwasserabgabe leicht anstieg, d.h. die Austauschreaktionen zwischen Ca^{++} , Mg^{++} und Na^+ -Kationen finden zunächst an leicht zugänglichen Stellen an den Rändern der Schichtpakete statt und setzen sich dann an den weniger leicht zugänglichen Stellen der Bentoniteilchen fort. Je nach dem Ionenaustauschvermögen des Bentonits ist der Abfall der Fließgrenzenwerte und Anstieg der Filtratwasserabgaben bei den zementstabilen Bentoniten weniger ausgeprägt als bei nichtzementstabilen.

Ca-Bentonitsorten sind bislang bei Dichtwänden noch nicht systematisch untersucht worden. In eigenen Versuchen wurden 6 verschiedene Ca-Bentonite getestet (Bentonit E, F, F', G, M und S).

Bentonit E und M sind handelsübliche Baubentonite; Bentonit F ist ein französisches Produkt, das außerdem mit 2 % Soda aktiviert wurde (Bentonit F'). Die Bentonite G und S stammen aus Griechenland und Sardinien.

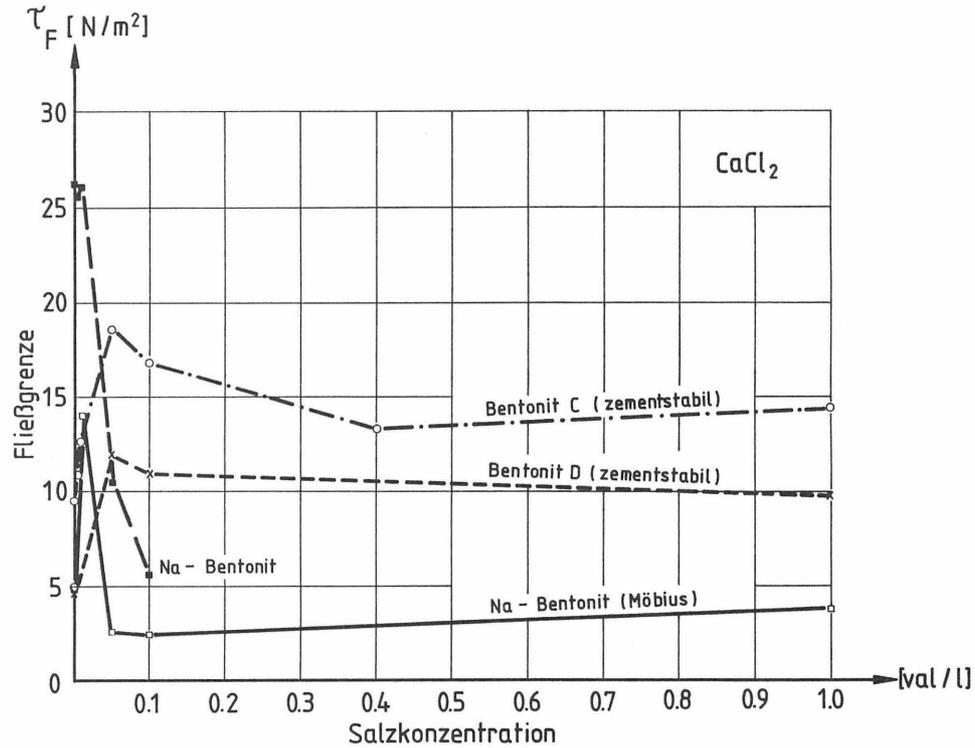


Bild 17: Einfluß von zweiwertigen Kationen (CaCl_2 -Lösungen) auf Fließgrenzenwerte von Bentonitsuspensionen mit zement- und nicht zementstabilen Bentoniten

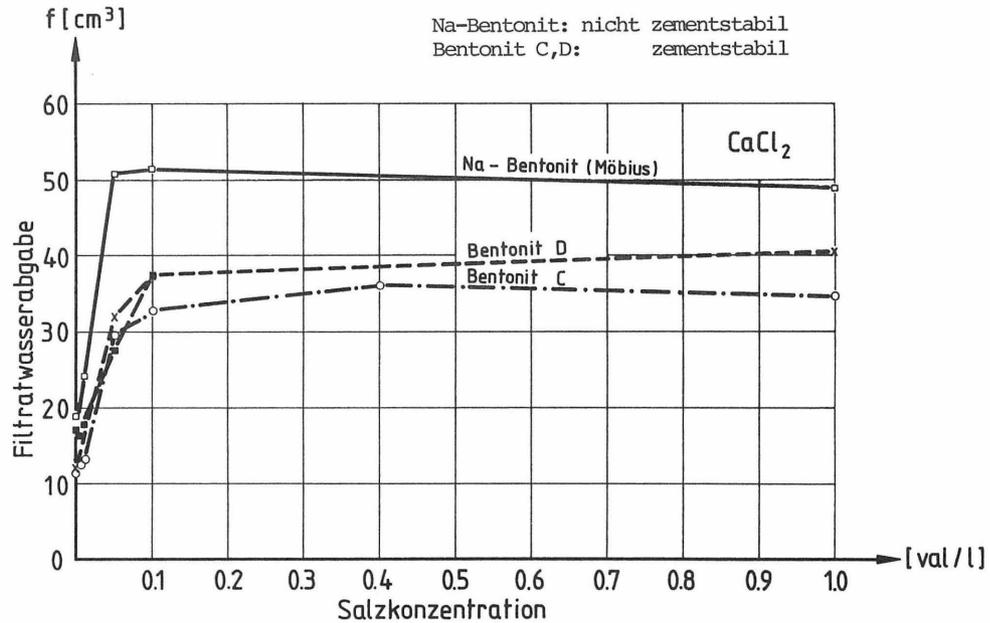


Bild 18: Einfluß von CaCl_2 -Lösungen auf die Filtratwasserabgabemengen von Bentonitsuspensionen mit zement- und nicht zementstabilen Bentoniten

Na-Bentonit: nicht zementstabil
 Bentonit B, C und D : zementstabil

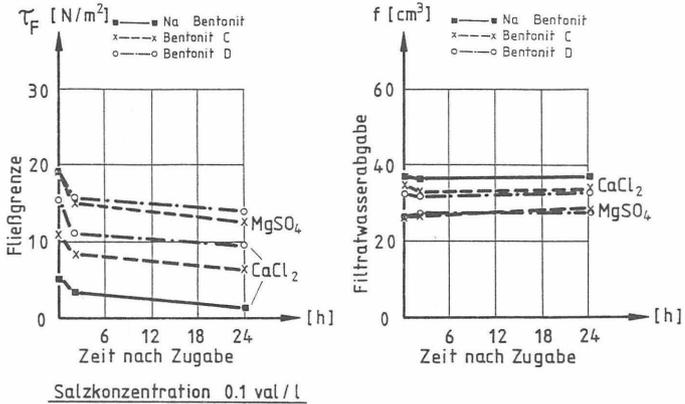


Bild 19a und b: Wirkung ein- und zweiwertiger Kationen auf Fließgrenzen und Filtratwasserabgaben von Bentonitsuspensionen mit zement- und nicht zementstabilen Bentoniten

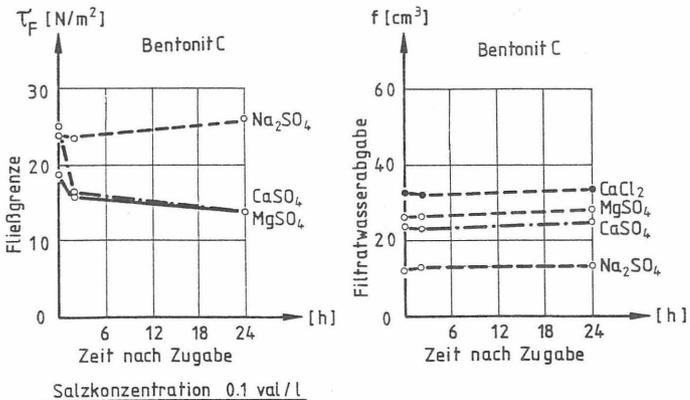


Bild 20a und b: Wirkung ein- und zweiwertiger Kationen auf Fließgrenzen und Filtratwasserabgaben einer zementstabilen Bentonitsuspension

5.1.2 Aufgaben des Bentonits

In Bentonit-Zement-Suspensionen kommen dem Bentonit 4 Aufgaben zu, wobei Stabilität und Stützwirkung einer Bentonit-Zement-Suspension dabei aus den Kenntnissen der Bentonittechnologie abgeleitet (Ruppert, Karstedt, 1981) werden.

1. Der Bentonit muß in Wasser soweit suspendiert werden, bis er ein steifes Gel (Kartenhaus) ausbildet und die Bentonitsuspension in der Lage ist, den Zement in Schwebelage zu halten.

Die Stabilität einer Bentonit-Zement-Suspension ist demnach primär von dem Verhältnis Bentonit zu Wasser abhängig.

2. Die hydrostatische Stützwirkung der Bentonit-Zement-Suspension muß gewährleistet sein. Bei feinkörnigen Böden muß der Bentonit bewirken, daß sich an der Kontaktfläche Erdreich/Suspension eine Filterschicht ausbildet. Wasser wird in das Erdreich abgefiltert, die Bentonitteilchen legen sich flach übereinander und bilden eine dichte Filterschicht. Über diese Membran kann der Stützdruck übertragen werden.

Bei grobkörnigen Böden muß die Thixotropie der Bentonit-Suspension auch durch Zementzugabe so hoch sein, daß die Bentonit-Zement-Suspension nur gering in das Erdreich eindringt, nach einer kurzen Strecke stagniert und der Stützdruck übertragen werden kann (Ruppert, Karstedt, 1981).

3. Das Wasserbindevermögen des Bentonits soll die Wasserdurchlässigkeit der Dichtwandmasse vermindern.
4. Der resistenterere Bentonit soll den empfindlichen Zement vor Angriff aggressiver Stoffe schützen.

5.2 Zement

Zement ist ein feingemahlendes hydraulisches Bindemittel, das mit Wasser angemacht sowohl an der Luft wie auch unter Wasser erhärtet. Hochofenzement enthält 20 - 64 M.% PZ-Klinker und 80 - 36 M.% Hüttensand, ein latent hydraulisches Bindemittel. Die Erhärtung des Hüttensandes erfolgt erst durch eine Sekundärreaktion in Gegenwart von Calciumhydroxid und Wasser. Durch den Hüttensand erhärtet Hochofenzement langsamer, erreicht aber die gleiche Endfestigkeit wie Portlandzement. Deshalb wird Hochofenzement bei der Dichtwandherstellung verwendet.

Die Hydratation des Zementes ist zu unterteilen in das Erstarren und das Erhärten, Prozesse, die fließend ineinander übergehen. Die Hydratation läuft in drei aufeinander folgenden Stufen ab:

Hydratationsstufe I

Das Tricalciumaluminat C_3A reagiert als erstes sehr rasch mit Wasser



und würde ein sofortiges Ansteifen des Leimes hervorrufen.

Der Gipszusatz verhindert dies, indem das Calciumsulfat das C_3A in die wasserreichen Verbindungen Trisulfat (Ettringit)



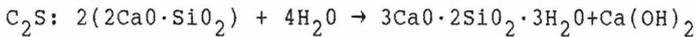
bzw. Monosulfat



einbaut. Das Trisulfat kristallisiert in langen Nadeln von der Oberfläche des Zementkorns aus und führt zum Ansteifen. Die Bildung von Trisulfat ist mit einer großen Volumenzunahme verbunden.

Hydratationsstufe II

Die Festigkeit des Zementsteins wird durch das rasch reagierende Tricalciumsilikat C_3S und Dicalciumsilikat C_2S hervorgerufen. Diese Calciumsilikathydratphasen (CSH-Nadeln) überbrücken den wassergefüllten Raum und verfilzen miteinander.



Hydratationsstufe III

In den restlichen Poren bilden sich überwiegend feine, kurze Nadeln und Fasern. Die Festigkeit wird dadurch erhöht. C_3S und C_2S spalten große Mengen an Kalkhydrat $Ca(OH)_2$ ab. Dies führt zu einer hohen Alkalität ($pH > 12,5$) des Porenwassers.

5.2.1 Zementsorten

Im Abschnitt 2.2 ist erklärt worden, daß sich nur Hochofenzemente für Bentonit-Zement-Suspensionen eignen. Nun erreichen gerade die wasserreichen Bentonit-Zement-Suspensionen bei Verwendung von Hochofenzementen mit unterschiedlichen Hüttensandanteilen bei gleicher Festigkeitsklasse unterschiedliche Festigkeiten (Caron, 1972 und Geil 1981). Bei den für Bentonit-Zement-Suspensionen eingesetzten Zementen ist zu unterscheiden zwischen HOZ 35L und sulfatbeständige HOZ 35L-NW/HS Zementsorten. Nach den vorliegenden Messungen war zu untersuchen, welchen Einfluß der Hüttensand bzw. die Hochofenschlacke (HOS) unterschiedlicher handelsüblicher Zemente auf die Eigenschaften von DWM haben und ob dies bei der Verwendung der DWM für die in Abschnitt 4 und 6 genannten Aufgaben zu berücksichtigen ist (Bild 21).

Zementart	Abkz.	HOS [M.-%] Hochofenschlacke
HOZ 35L	H	50 %
HOZ 35L	S	55 %
HOZ 35L	W	65 %
HOZ 35L-NW/HS	T	70 %
HOZ 35L-NW/HS	L	72 %

Bild 21: Untersuchte Zementsorten

5.2.2 Aufgaben des Zementes

Dem Zement kommen in der Dichtwandmasse folgende Aufgaben und Eigenschaften zu:

1. Er soll die Verarbeitbarkeit bis zu mehreren Stunden gewährleisten, d.h. eine längere Erstarrungszeit haben.
2. Er soll der Masse das feste Gefüge geben, im erhärtenden und ausgehärteten Zustand in der DWM eine ausreichende Festigkeit haben und die Masse vor Erosion schützen.
3. Er soll chemisch resistent gegen den Angriff aggressiver Stoffe sein.

5.3 Bentonit-Zement-Suspension

5.3.1 Frischsuspensionen

Bentonit-Zement-Suspensionen (BZS) sind kolloidale Systeme, in denen Bentonit und Zement als feste Phasen im Dispersionsmittel Wasser vorliegen. Bentonit bildet mit Wasser Gele dadurch, daß sich die Kristallplättchen nach Art eines Kartenhauses sperrig gegeneinander abstützen und so ein Feststoff vorgetäuscht wird.

Die Verflüssigung eines Gels durch mechanische Einwirkung und Wiedererstarrung nach Beruhigung nennt man Thixotropie (Stauf, 1960). Sie tritt sowohl bei Bentonitsuspensionen als auch bei Zementsuspensionen (Krenkler, 1980) auf.

Ein Maß für die Thixotropie ist zum einen die Erstarrungszeit vom Sol zum Gel, zum anderen die Größe des Versteifungsgrades, den das Gel der Verflüssigung entgegengesetzt. Braune und Richter (1949) haben den Einfluß der Elektrolyte auf die Thixotropie von Na-Bentoniten untersucht. Sie stellten fest, daß schon geringe Elektrolytkonzentrationen den Versteifungsgrad stark erhöhen und nach Erreichen eines Maximums die Fließgrenze wieder sinkt. Zweiwertige Kationen bewirken gegenüber einwertigen Kationen dabei schon bei niedrigeren Konzentrationen das Maximum. Nach anfänglich bevorzugter Adsorption der Kationen werden auch die Anionen adsorbiert, die mit gleicher Ladung wie die Bentonitteilchen deren Vernetzung wieder rückgängig machen (Braune, Richter (1949). Je nach Ionenaustauschvermögen der verwendeten Na-Bentonite treten nach Zugabe von Zement die "Reaktivierung" des Bentonits zu Ca-Bentonit und damit zunächst ein Anstieg und dann eine Reduzierung der Thixotropie ein.

Die physikalischen Eigenschaften von BZS werden zur Beurteilung der Viskosität und Fließeigenschaften durch die Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter gemessen. Die Auslaufzeit ist ein Kennwert für die komplexen Eigenschaften aus Dichte, Viskosität und Scherfestigkeit (Ruppert, 1980).

Den zeitlichen Verlauf der Viskosität von BZS hat Caron (1972) anhand verschiedener Mischungen untersucht. Die Viskosität (Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter) ergab bei allen Mischungen qualitativ den in Bild 1 (Abschnitt 2) dargestellten Verlauf. Er ist nach Caron (1972) durch 3 Phasen gekennzeichnet:

- In der ersten Phase - sofort nach Zugabe des Zementes zur Bentonitsuspension - steigt die Viskosität sehr stark an. Als Ursache gibt Caron ein "falsches Abbinden" an, das auf die Wasseraufnahme des Zementes und die Flockung des Bentonits zurückgeführt wird,
- in der zweiten Phase wird das "falsche Abbinden" durch den Mischvorgang revidiert. Hier wandeln die im Zement enthaltenen Calciumionen den Natriumbentonit teilweise in einen weniger wasseraufnahmefähigen Calciumbentonit um. Diese Vorgänge führen zur Verflüssigung der Suspension.
- in der dritten Phase hydratisiert der Zement und die BZS versteift. Beginn und Verlauf der Hydratation sind dabei von Faktoren wie Temperatur, Zementart und Zustand der BZS (Ruhe, Bewegung) abhängig.

Caron stellt qualitativ dar, daß die Viskosität der ruhenden BZS stärker und rascher ansteigt als die Viskosität der bewegten Suspensionen.

Die Wirkung von Ca^{++} aus dem Zement auf Bentonit ist nach Abschnitt 5.1.1 nicht nur abhängig von der Calcium-Konzentration sondern auch von dem Ionenaustauschvermögen des Bentonits. Hinzu kommt, daß die Calcium-Konzentration im Zement mit unterschiedlichen HOS-Gehalten bei der "Reaktivierung" des Bentonits und den damit entstehenden physikalischen Eigenschaften eine Rolle spielt.

5.3.2 Erhärtende Bentonit-Zement-Suspensionen

Durch die zeitabhängige Hydratation des Zementes bildet sich ein Hydrogel. Die zusammenhängenden Teilchen des Zement-Gels haben fadenförmige Struktur.

Die Eigenschaften des Gels sind abhängig von der Bentonit- und Zementart und von deren mengenmäßiger Verteilung im Gemisch. Die zusammenhängenden Teilchen des Gels haben bei geringem Stoffvolu

men eine große Oberfläche. Das in den Hohlräumen des Gelgerüsts befindliche Wasser ist durch Anziehungskräfte stark gebunden. Durch Verdampfen des Gelwassers von bereits erhärteten Dichtwandmassen (DWM) im Trockenofen bei 105°C erhält man ein leicht zwischen den Fingern zerreibbares Korngemenge. Die Festigkeit der Dichtwandmassen stützt sich offensichtlich zu einem nicht unwesentlichen Teil auf die in Gelen wirkenden Anziehungskräfte.

Dünne Wasserschichten werden an den Oberflächen der Zementgel-poren festgehalten, so daß die Gelporen keine Wasserdurchlässigkeit zulassen (pseudofestes Wasser). Mit zunehmender Wasserlagerung entsteht im Porenraum neue Zementgelmasse; die Kapillarpore (nicht gebundenes Wasser) ist kleiner und die Durchlässigkeit geringer geworden (Bild 22). Diese Vorgänge werden verstärkt durch das Wasserbindevermögen des Bentonits.

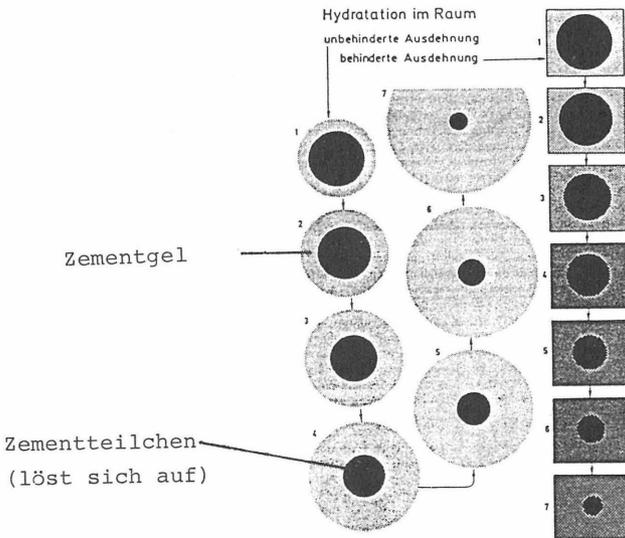


Bild 22: Verminderung des Porenraumes durch Zementhydratation (Krenkler, 1980)

5.3.2.1 Porenzahl und W/Z-Faktoren

Nachfolgend wird die Porenzahl für Bentonit-Zement-Suspensionen mit Na-Bentonit und Ca-Bentonit kurz erläutert. Bei Korndichten von $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ für Bentonit und $\rho_s = 3,0 \text{ t/m}^3$ für Zement er rechnen sich die Porenzahlen für folgende Mischungen zu:

Na-Bentonit-Zement-Suspension

Bentonit	42 kg	}	$V_k = \text{Volumen Feststoffe}$ $V_p = \text{Volumen Poren, wasser- gesättigt}$
Zement	175 kg		
Wasser	926 kg		

Angaben pro m^3 BZS

$$W/Z = 5,3$$

$$e = \frac{V_p}{V_k} = \frac{926}{16 + 58} = 12,5 \text{ [-]} \quad (\text{Gl.3})$$

Ca-Bentonit-Zement-Suspension

Bentonit	175 kg	
Zement	175 kg	
Wasser	875 kg	

$$W/Z = 5,0$$

$$e = \frac{V_p}{V_k} = \frac{875}{56 + 58} = 7,0 \text{ [-]} \quad (\text{Gl.4})$$

Die großen Porenzahlen beider Mischungen verdeutlichen, daß in der Bodenmechanik verwendete Feststoffrechnungen bei diesem Stoffgemisch nicht ausreichen, um die geringe Durchlässigkeit zu erklären. Bei der Durchströmung von erhärteten Dichtwandmassen (DWM) kommt der Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoff (Bild 23) große Bedeutung zu. Die dichtende Wirkung der DWM beruht auf drei Tatsachen:

1. Quellung des Bentonits und Dichtwirkung (Bild 16)
2. Verminderung des Porenraumes durch Zementhydratation (Bild 22)
3. Oberflächenspannung zwischen Feststoffen und Flüssigkeit (Bild 23)

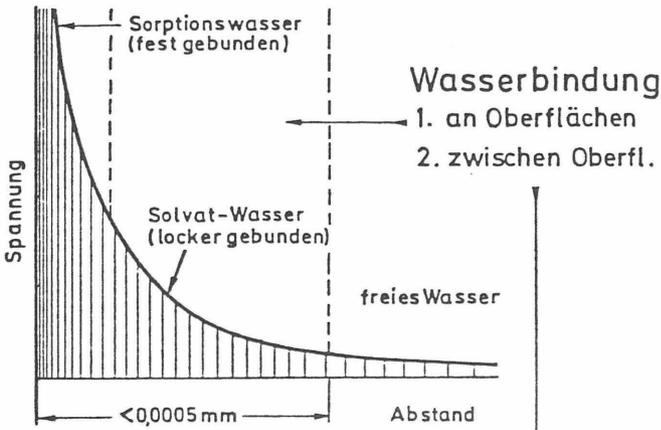


Bild 23: Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoffen

5.3.2.2 Bindungskräfte

In reinen Bentonitgelen kann die Größe der Bindungskräfte qualitativ durch die elektrostatischen Anziehungskräfte abgeschätzt werden, die quadratisch mit einer Verminderung der Ionenabstände zunehmen:

$$F = \frac{e_1 * e_2}{E_r * r^2} \quad (\text{Gl.5})$$

F = Anziehungskraft

$e_1 * e_2$ = entgegengesetzte Ionenladungen

E_r = relative Dielektrizitätskonstante

r = Abstand der Ionenmittelpunkte.

Die Ionenladungen von Ca^{++} und Na^+ stehen im Verhältnis 2 : 1. Die relative Dielektrizitätskonstante ist abhängig von dem zwischen die Ionen drängenden Medium. Der Abstand der Ionenmittelpunkte ist eine Funktion der Teilchenmenge und der -größe. Unter Berücksichtigung der Wasserbindevermögen von Ca-Bentonit und Na-Bentonit nach Schulze, Muhs (1967) ergibt sich folgende Massenäquivalenz unter der Bedingung, daß sie im gequollenen Zustand den gleichen Feststoffraum einnehmen:

$$m_{\text{Na}} = 2,2 m_{\text{Ca}} \quad (\text{Gl.6})$$

m_{Na} = Masse Na-Bentonit

m_{Ca} = Masse Ca-Bentonit.

D.h. 42 kg Na-Bentonit pro m³ Wasser binden soviel Wasser, daß sie den gleichen Feststoffraum haben wie 92,4 kg Ca-Bentonit pro m³ Wasser im gequollenen Zustand. Unter der Voraussetzung, daß alle Bentonitteilchen in der Suspension gleich groß, gleichmäßig im Raum verteilt sind und das Verhältnis der Teilchenmengen von Ca-Bentoniten und Na-Bentoniten 1 : 10 ist (Simons, 1980), ergibt sich folgendes Gedankenmodell:

Nach der Dispergierung steht den beiden Bentonitpartikeln der gleiche Raum zur Verfügung. Der Ca-Bentonit zerfällt in 2 gleich große Teile bei der Quellung, der Na-Bentonit zerfällt in 10 x 2 = 20 gleiche Teile.

Auf der Strecke l ergeben sich die maximalen Teilchenabstände a_{Ca}, a_{Na} zu:

Ca-Bentonit

Na-Bentonit

$$a_{Ca} = l - d_{Ca} \quad (Gl.7)$$

$$a_{Na} = \frac{(1 - d_{Na})}{19} \quad (Gl.8)$$

d_{Ca} = Dicke des
Ca-Bentonitteilchen

d_{Na} = Dicke des
Na-Bentonitteilchen

$$d_{Na} = \frac{1}{2} d_{Ca} \quad (Gl.9)$$

$$a_{Na} = \frac{\left(1 - \frac{d_{Ca}}{2}\right)}{19} \quad (Gl.10)$$

$$a_{Ca} \gg a_{Na} \quad (Gl.11)$$

$$\text{Ionenladungsprodukt } (e_1 * e_2)_{Ca} = 2 (e_1 * e_2)_{Na} \quad (Gl.12)$$

$$a \sim r \quad (Gl.13)$$

Coulomb'sche Anziehungskräfte:

$$F_{Ca} = \frac{(e_1 * e_2)_{Ca}}{E_r * a_{Ca}^2} \quad (Gl.14)$$

$$F_{Na} = \frac{(e_1 * e_2)_{Na}}{E_r * a_{Na}^2} \quad (Gl.15)$$

Verhältnis der beiden Anziehungskräfte

$$\frac{F_{Ca}}{F_{Na}} = \frac{(e_1 * e_2)_{Ca} \cdot E_r * a_{Na}^2}{E_r * a_{Ca}^2 * (e_1 * e_2)_{Na}} \quad (Gl.16)$$

aus Gl (12) und (15) folgt:

$$\frac{F_{Ca}}{F_{Na}} = \frac{2 (e_1 * e_2)_{Na} \cdot E_r * a_{Na}^2}{E_r * a_{Ca}^2 * (e_1 * e_2)_{Na}} = \frac{2 a_{Na}^2}{a_{Ca}^2} \quad (Gl.17)$$

aus Gl. 10 und 17

$$a_{Ca} \gg a_{Na}$$

folgt $F_{Na} \gg F_{Ca}$.

Solange der Quotient Gl. 17 kleiner 1 ist, sind die Bindungskräfte in der Na-Bentonitsuspension wesentlich größer als in der Ca-Bentonitsuspension bei gleichem Feststoffraum. Wenn auch van der Waalsche Kräfte wirken, verstärkt sich der Effekt noch. Aus diesen Gründen müssen bei der Verwendung von Ca-Bentoniten in der BZS größere Mengen, als nach der Feststoffäquivalenz notwendig wäre, eingesetzt werden.

5.3.2.3 Reduzierter Wasser-Zement-Faktor W_R/Z

Beim Zumischen des Zementes zur Bentonitsuspension ist durch das Wasserbindevermögen des Bentonits die Wassermenge des Anmachwassers wesentlich geringer, und es ergibt sich somit der "reduzierte Wasser/Zement-Faktor (W_R/Z -Faktor)", dessen Begriff hier neu eingeführt wird.

$$W_R/Z\text{-Faktor} = \frac{\text{Wassermenge (Anmachwasser)}}{\text{Zementmenge}}$$

mit

Wassermenge		Wassermenge		Gelwasser
des	=	der	minus	des
Anmachwassers		Suspension		Bentonits

In Bild 24 sind die W_R/Z -Faktoren verschiedener BZS aufgetragen. Bei der Hydratation des Zementes werden auf 100 Teile Zement ca. 25 Teile Wasser chemisch und 15 Teile durch Adsorption gebunden. Das restliche Wasser ist in den Kapillarporen vorhanden, dabei nimmt mit zunehmendem W/Z -Faktor die Menge der Hydratationsprodukte ab und die Menge an Kapillarwasser zu. Diese Wassermenge wird durch das am Bentonit gebundene Gelwasser reduziert. Verglichen mit üblichen W/Z -Werten für Zementsuspensionen liegen die W_R/Z -Faktoren der BZS deutlich höher. Die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Hydratation ist die gleiche, jedoch dauert es länger, bis der größere Kapillarraum mit Gelhydrat steigender Konzentration gefüllt ist. BZS unterliegen deshalb einem verzögerten Festigkeitsanstieg und einer Verringerung der Durchlässigkeit mit der Zeit.

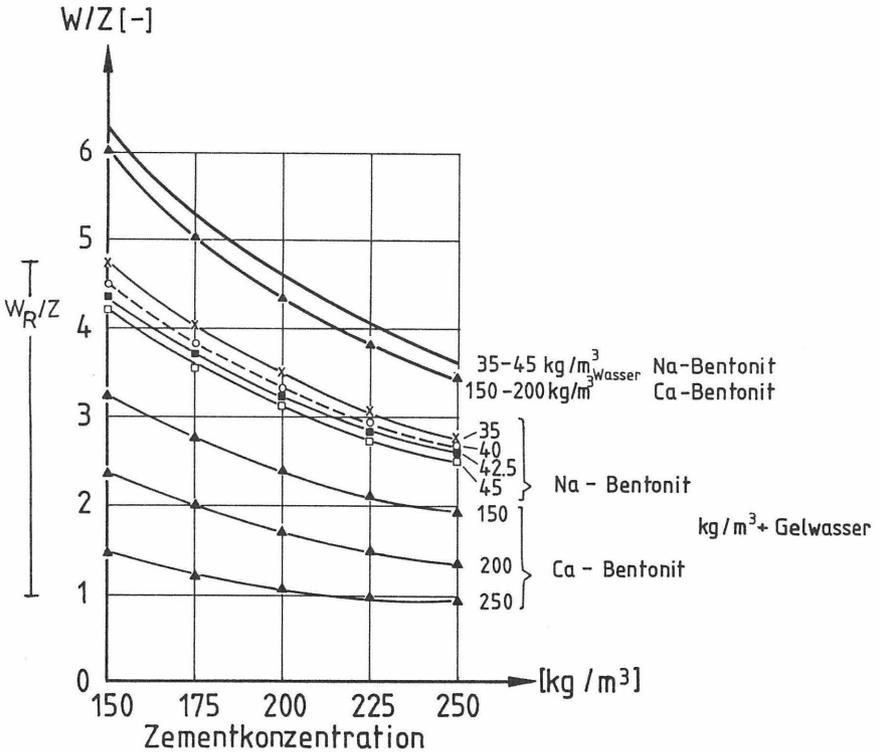


Bild 24: W_R/Z -Faktoren von Na-BZS und Ca-BZS

5.4 Zusammenfassung

Eine der wichtigsten spezifischen Eigenschaften von Bentonit und Zement ist die Gelbildung, die die relativ hohen Wassermengen physikalisch und durch die Hydratation chemisch bindet. Durch die am Bentonit gebundenen Wassermengen entsteht ein reduzierter W/Z -Faktor (W_R/Z -Faktor). Die bei der Zementerhärtung im Porenraum physikalisch und chemisch gebundenen Wassermengen verringern den effektiven Porenraum. Für die Auswahl der BZS muß die Reaktivierung des Bentonits durch den Zement abgeschätzt werden. Für die

Quantifizierung des Ca-Bentonits in der BZS reicht die nach dem Verhältnis ihres Wasserbindevermögens notwendige 2,2-fache Erhöhung der Na-Bentonitkonzentration nicht aus, um die gleichen Wasserbindungskräfte zu mobilisieren. Die Beurteilungen der Festigkeit und Dichtigkeit erhärtender BZS sollen mit dem reduzierten W_R/Z -Faktor vorgenommen werden.

Unter der Voraussetzung, daß die Feststoffe sich in den im Labor betrachteten Proben nahezu gleich verteilen und die Hydratation des Zements vollständig abgeschlossen ist, ergibt sich eine "modifizierte Feststoffrechnung" für erhärtende und erhärtete Proben, die in Abschnitt 8 vorgestellt wird.

6 Beschreibung und Ergebnisse eigener Baustellenmessungen

Die Notwendigkeit, die physikalischen und chemischen Beanspruchungen der Dichtungsmasse im Labor zu untersuchen, steht in einem engen Zusammenhang mit der Aufgabe, über die Anforderungen und Eigenschaften von Dichtwandmassen im Gebrauchszustand Erkenntnisse zu sammeln. Die Erarbeitung einer Matrix für die Anforderungen, die an solche Dichtungen gestellt werden, erwies sich als sehr schwierig, da Richtlinien bzw. Untersuchungen auf diesem Gebiet praktisch nicht vorhanden waren.

Ziel der Messungen, Bewertung von Dichtungsmassen und Ausführungen vor Ort war es, Erfahrungen an Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand zu sammeln sowie Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften im Gebrauchszustand zu gewinnen.

6.1 Dichtwand Ingelheim

6.1.1 Baustellenbeschreibung

Die Altdeponie (Altlast) des Chemiewerkes Boehringer in Ingelheim wurde 1979 durch eine die Altlast umschließende Dichtungswand saniert. Die 16 - 18 m tiefe Dichtungswand band 2,50 m tief in Tonmergel ein. Die Dichtungsmasse bestand aus

32,7 kg Na-Bentonit C (35 kg Bentonit pro m³ Wasser)
200,0 kg HOZ 35L (HOS 70 M.-%)
921,0 kg Wasser
(Angaben kg pro m³ Dichtwandmasse)

Über die Messungen an den frischen und erhärteten Dichtwandmassen berichteten Schirmer (1980) und Geil (1981, 1984). Die ständige Beobachtung von 3 Beobachtungspegeln außerhalb der Deponie zeigte nach dem Bau der Dichtungswand einen Anstieg des anströmenden Grundwassers bis zu 1,20 m (Schirmer, 1980).

Durch ein Drainagesystem innerhalb der Deponie wurde zur größeren Sicherheit ein hydraulisches Gefälle vom Grundwasser weg erzeugt. Somit strömt kein Sickerwasser nach außen, sondern es strömt in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes k (m/s) schwach beton-aggressives Grundwasser durch die Dichtungswand.

6.1.2 Messungen auf der Baustelle und Darstellung der Ergebnisse

Durch die ständige Überprüfung der Bentonit-Zement-Suspensionen bei der Herstellung (Mischanlage) und in der Dichtungswand konnten folgende Ergebnisse erzielt werden, die z.T. durch Labormessungen im Baustellenlabor ergänzt wurden.

1. Die optimalen Festigkeiten und Durchlässigkeitsbeiwerte werden erzielt, wenn der Zement der Bentonitsuspension nach 2 Stunden Quellzeit zugemischt wird (Bild 25).

Der Quellvorgang der Bentonitsuspension ist ein zeitabhängiger Vorgang. Auch bei optimalen Mischvorgängen quillt die Bentonitsuspension noch nach. Entsprechend dem Quellvorgang und Aufbau der Kartenhausstruktur sind die Stellen mit austauschfähigen Natrien bei den 4 bis 24 Stunden gequollenen Suspensionen besser zugänglich, d.h. es tritt ein vermehrter Austausch mit Ca-Ionen auf. Die Bentonitteilchen ziehen sich entsprechend Abschnitt 4.1.4.2 wieder zusammen, und weniger Wassermengen werden von den Feststoffen gebunden. Dadurch entstehen höhere W_R/Z -Werte, was eine geringere Festigkeit, größere Kapillarporen und somit höhere Durchlässigkeiten dieser erhärteten BZS bewirkt. Die BZS mit dem nicht gequollenen Bentonit hatte die geringsten Festigkeiten und größten Durchlässigkeiten. Nicht gequollene Bentonitsuspensionen sind am unbeständigsten gegen Ca-Ionen (Möbius 1976).

Einfluß der Quellzeit der Bentonitsuspensionen auf

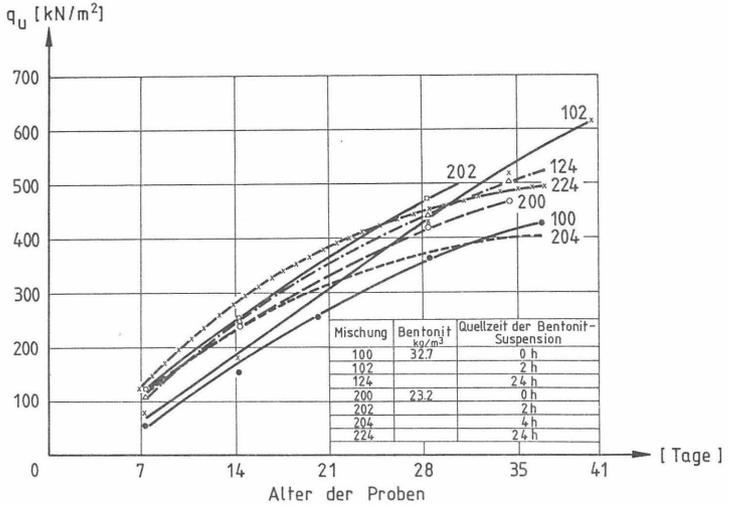


Bild 25a: Einaxiale Druckfestigkeiten

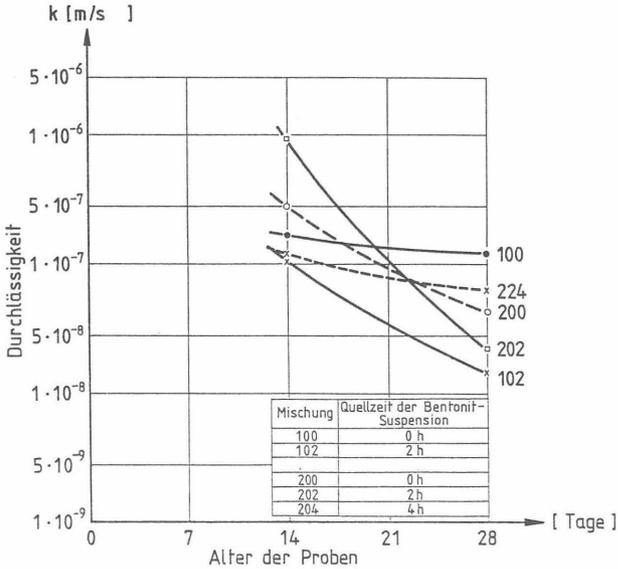


Bild 25b: Durchlässigkeiten der Bentonit-Zement-Suspensionen

Zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Bentonit-Zement-Suspensionen wurden Proben aus der Mischanlage, dem Zulaufrohr über der Wandlamelle und aus der Wand, 0,5 m über der Sohle, entnommen.

2. Die Ergebnisse aus Viskositätsmessungen (Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter) und der Bestimmung der Fließgrenzen τ_F unterliegen großen Schwankungen. Von der Mischanlage zum Schlitz wurde eine geringe Zunahme der Auslaufzeit aus dem Marshtrichter festgestellt. Proben aus der Wand wiesen meist Auslaufzeiten größer gleich 120 Sekunden auf. Dementsprechend stiegen die Fließgrenzenwerte in der Wand an (Bild 26).

DICHTWANDMASSE					
32,5 kg Bentonit		200,0 kg Zement Angaben pro m ³		921,0 kg Wasser	
PARAMETER	ENTNAHME- STELLE	MESSWERT	ANZAHL DER MESSWERTE	MITTEL- WERT	STANDARD- ABWEICHUNG
Auslaufzeit aus dem Marshtrichter t_M [s]	Mischanlage	30 - 100	188	64	17,53
	Zulaufrohr	55 - 78	28	65,5	9,89
	Wand	60 - 100	21	74	21,6
	0,5 m über der Sohle	100 - 120	81	104	23,85
		> 120	48		
Fließgrenze τ_F [N/m ²]	Mischanlage	85 - 67,8	121	41,56	16,91
	Zulaufrohr	31,6 - 68,4	47	46,88	12,51
	Wand				
Messgerät Harfe	0,5 m über der Sohle	16,1 - 67,8	124	58,67	14,32
Dichte ρ [t/m ³] Messgerät Spülungswaage	Mischanlage	1,11 - 1,16	126	1,153	0,01
	Zulaufrohr	1,14 - 1,21	47	1,154	0,01
	Wand	1,17 - 1,37	123	1,263	0,04
	0,5 m über der Sohle				

Bild 26: Physikalische Eigenschaften der Bentonit-Zement-Suspensionen der Baustelle

3. Während der Herstellung nehmen die Dichten der Bentonit-Zement-Suspensionen in der Wand zu und die Wassergehalte ab (Bilder 27, 28 und 29). Dies ist zum einen auf die Eintragung von Bodenteilchen und zum anderen auf die Abfiltration von Wasser in das anstehende Erdreich zurückzuführen.

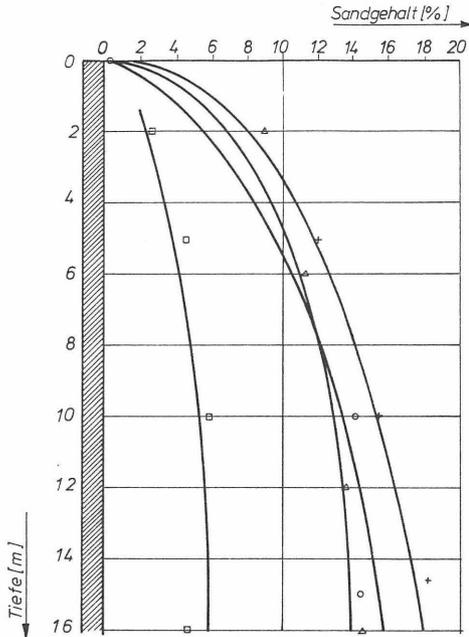


Bild 27: Sandgehalt der BZS in Abhängigkeit von der Tiefe (Geil, 1982)

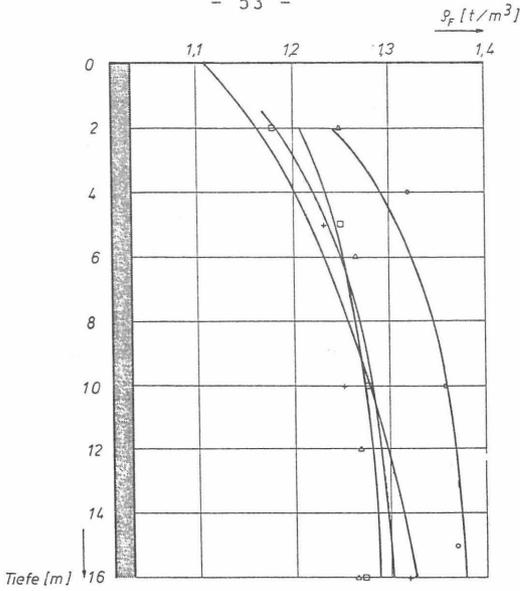


Bild 28: Dichte der BZS in Abhängigkeit von der Tiefe

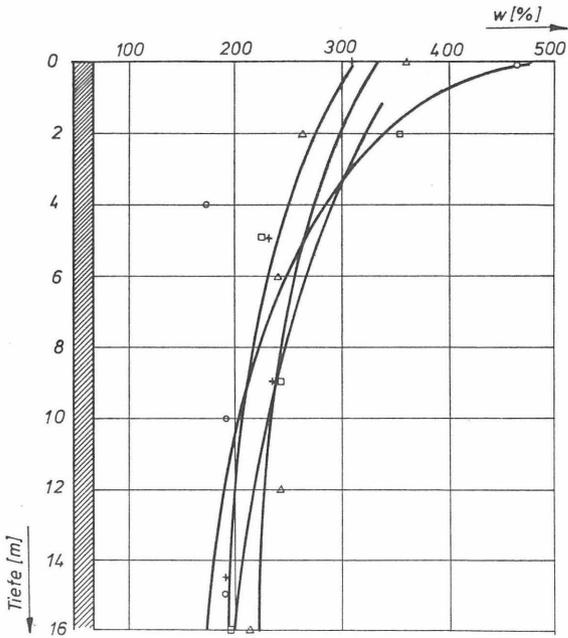
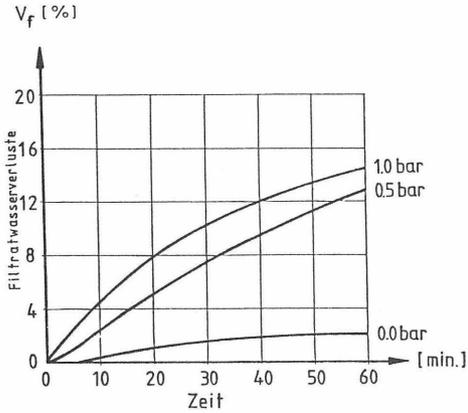
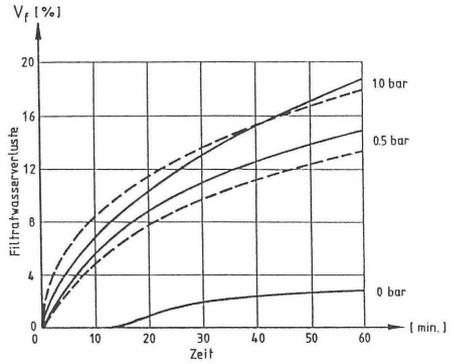


Bild 29: Wassergehalt der BZS in Abhängigkeit von der Tiefe (Geil, 1982)

4. Die Suspensionsverluste während des Aushubs betragen 70 %. Die einzelnen Lamellen wurden jeweils mit 30 cm Überschneidung hergestellt. Bei einer Greiferbreite von 2,80 m und einer Wandtiefe von 20 m sind dies 21 % Mehraushub. Genaue Größen über die Kornverteilung des Bodens lagen nicht vor. Eine angenommene Eindringung der Suspension von ca. 5 cm in den angrenzenden Boden führt nochmals zu einem Mehrverbrauch von 3,5 % (Frank, 1981). Bei Freilegung der Probelamelle wurde bis 4 m Tiefe keine größere Eindringung festgestellt. Messungen an fertiggestellten Schlitzern ergaben, daß sich nach 24 Stunden die Suspensionsspiegelhöhe im Schlitz um ca. 3 m gesenkt hatte. Dies ergab einen Mehrverbrauch von 15 %. Eigene Messungen der abgefilterten Wassermengen von Bentonit-Zement-Suspensionen bei unterschiedlichen Drücken brachten Volumenabnahmen des eingebauten Materials bis zu 19 %, wobei die Abfiltrierung von Wasser nach einer Stunde noch nicht abgeschlossen war (Bild 30). Die Summe des Mehrverbrauchs durch Überschneidung bereits fertiggestellter Schlitzern und Eindringung in den Boden sowie Filtrationsvorgänge in 24 Stunden bedingt durch das Eigengewicht bewirkten einen Mehrverbrauch von 39,5 %. Dies ließ vermuten, daß die Filtration der Bentonit-Zement-Suspension auch durch die Rührbewegung des Greifers verstärkt wird. Eigene Untersuchungen an Dichtwandmassen in einem Rührversuch (Bild 31) bestätigten diese Annahme.



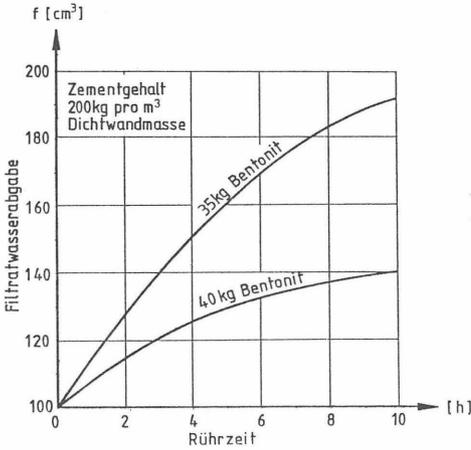
30a: Labormessungen



30b: Baustellenmessungen

Bild 30a und b: Filtratwasserverluste von Bentonit-Zement-Suspensionen in Abhängigkeit von der Zeit bei konstanten Druckhöhen

5. Verstärkte Filtration und Zumischung von Bodenteilchen in die Suspension führten zu höheren Festigkeiten und geringeren Durchlässigkeiten der Suspension in der Wand gegenüber den Proben aus der Mischanlage.



Mischung mit 40 kg Bentonit

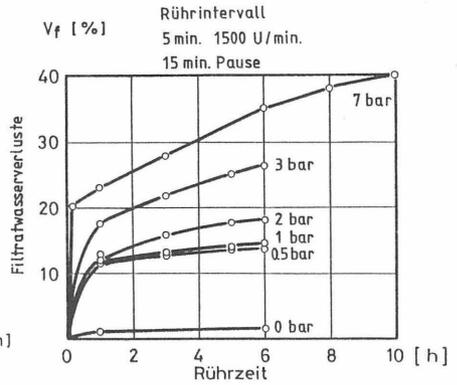


Bild 31a: Labormessungen
(Geil, 1981)

Bild 31b: Filtratwasserverluste
bezogen auf das Wasservolumen
in der Filterpresse

Bild 31: Filtratwasserabgaben und Filtratwasserverluste in
Abhängigkeit von der Rührzeit

6. Die ermittelten Werte der einaxialen Druckfestigkeiten wiesen hohe Schwankungen auf. Die Proben lagerten bis zur Prüfung 28 Tage unter Wasser. Die Gegenüberstellung der mittleren Tages-temperatur der Monate mit den zugehörigen Werten der einaxialen Druckfestigkeiten der Proben aus der Wand ist in Bild 32 dargestellt. Die Druckfestigkeiten der Proben waren von der Tiefe der Entnahmestelle und der Lagerungstemperatur abhängig.

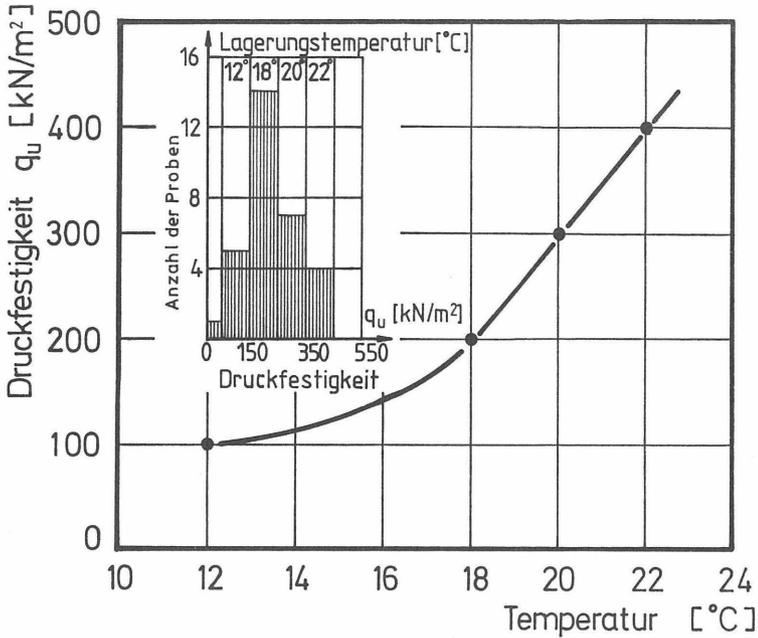


Bild 32: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Temperatur

- Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Proben unterlagen Schwankungen von etwa 1 Zehnerpotenz; sie wurden mit zunehmender Tiefe und höheren Druckfestigkeiten geringer (s.a. Bild 33).

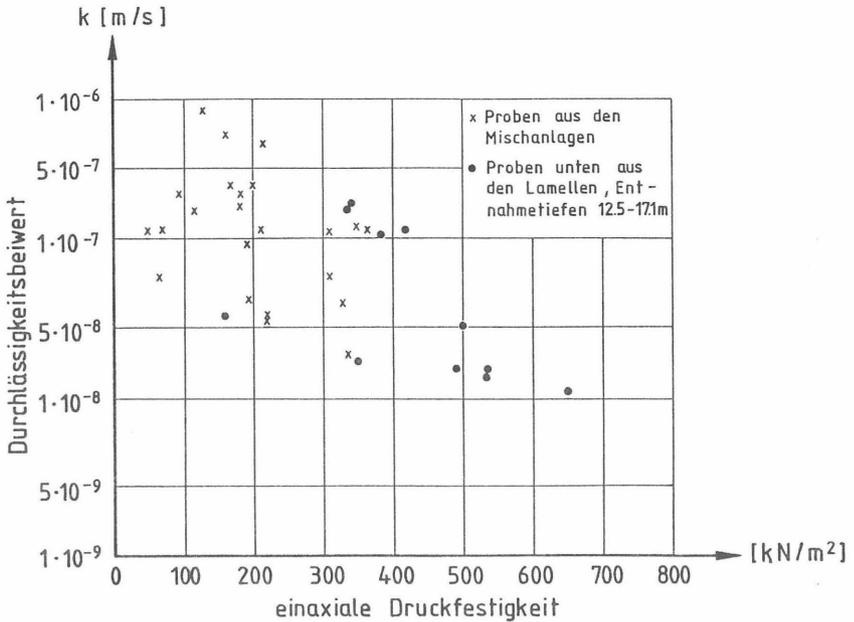


Bild 33: Durchlässigkeitsbeiwerte von erhärtenden Dichtwandmassen aus Mischanlage und Lamellen.

Nach der Umschließung der Altlast lagerten Proben aus der Mischanlage in Brunnen im Grundwasser und Sickerwasser. Vor Beginn der Baumaßnahme lagerten und erhärteten Proben in reinem Leitungswasser und Gemischen aus Leitungswasser und Sickerwasser. Hierbei sollte berücksichtigt werden, daß die Dichtwandmasse bei der Baumaßnahme im Grund- und Sickerwasser erhärtete, und es sollte so geprüft werden, welchen Einfluß das auf die Durchlässigkeit hat. Nach 2 Jahren wurden Proben aus den Brunnen entnommen und im Labor die Durchlässigkeit gemessen. In Bild 34 sind die Ergebnisse aus den Labor- und Baustellenmessungen gegenübergestellt.

Deponie	Industriemülldeponie		Hausmülldeponie	Haus- / Industriemülldeponie					
Angriffsgrade (DIN 4030) der Wasser	 sehr stark	 schwach				 stark			
	Sickerwasser	Grundwasser	Sickerwasser	Sickerwasser	Sickerwasser	Grundwasser			
Bentonit		32,7	32,7	37,2	36,9	35,0	36,9	37,2	
Zement		200,0	200,0	175,0	200,0	150,0	200,0	175,0	
Anmachwasser [kg/m³]		924,0	924,0	930,0	922,0	945,0	922,0	930,0	
Lagerung in Leitungswasser %		90		100				60	
Sickerwasser %									
Grundwasser %			100						
Zeit	2 a	28 d	2 a	28 d	24 d	28 d		24 d	
Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$9,1 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$

Bild 34: Durchlässigkeitswerte in Abhängigkeit von der Betonaggressivität des Wassers und der Lagerungsdauer (Geil, 1984)

8. Die Prüfung der Durchlässigkeit und Beständigkeit ergab nach 28-tägiger und 2-jähriger Lagerung im schwach betonaggressiven Wasser und Leitungswasser keinen schädigenden Einfluß. Nach zweijähriger Lagerung in sehr betonaggressivem Wasser wurde ein k-Wert von $3,1 \cdot 10^{-8}$ m/s gemessen, der unter dem für die Wand geforderten k-Wert $1 \cdot 10^{-7}$ m/s liegt.

6.2 Dichtwand Leverkusen

6.2.1 Baustellenbeschreibung

Baustellenmessungen wurden ebenfalls bei der Herstellung der hydrologischen Sperrwand vor der Deponie der Firma Bayer AG in Leverkusen durchgeführt. Die 15,5 - 26,5 m tiefe Dichtungswand hat eine Länge von 1,340 km. Die Dichtungsmasse aus

36,7 kg Na-Bentonit B (40 kg/m³ Wasser)
200,0 kg HOZ 35L Zement (HOS 65 M.-%)
918,0 kg Wasser

mit dem höheren Bentonitgehalt ergab in Labor- und Baustellenmessungen eine niedrigere Filtratwasserabgabe gegenüber der auf der Baustelle Ingelheim verwendeten Masse (Bild 31 und 35).

6.2.2 Messungen auf der Baustelle und Darstellung der Ergebnisse

Es wurden vornehmlich Messungen über Aushubzeit, Mehrverbrauch an Suspension, Dichte und Sandgehalt der Suspension während des Aushubs durchgeführt.

Die Dichtungswand wurde mit 4 Baggergeräten hergestellt, wobei im Pilgerschrittverfahren Einzellamellen mit jeweils 25 cm Überschneidung ausgehoben wurden. Der Baugrund bestand aus unterschiedlich mächtigen Sand/Kies-Schichten. Die Dichtwand band 1,50 m in tertiäre Feinsande und devonischen Tonstein ein. Die durchschnittlichen Aushubzeiten betragen 5 - 6 Stunden; bei tiefen Wandabschnitten, schwierigen Bodenverhältnissen oder Geräteausfall bis zu 12 Stunden.

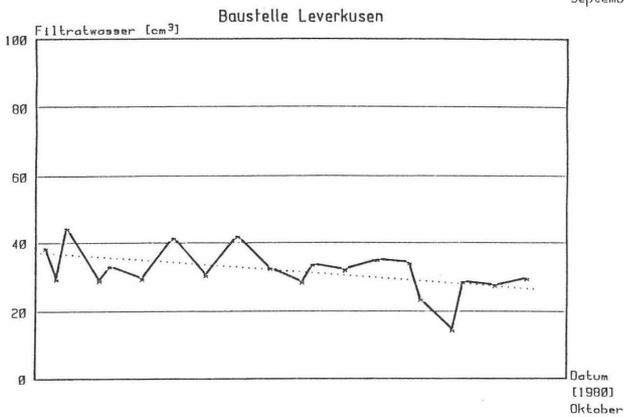
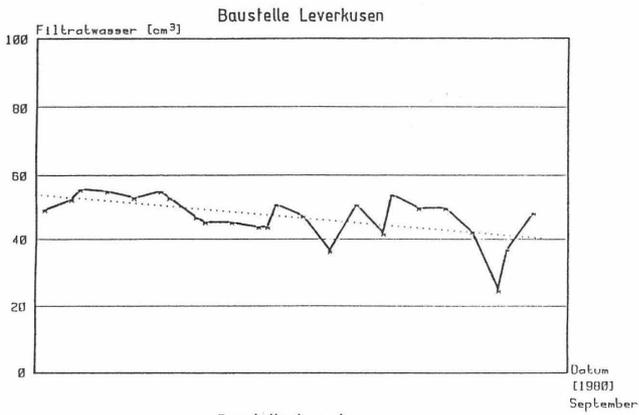
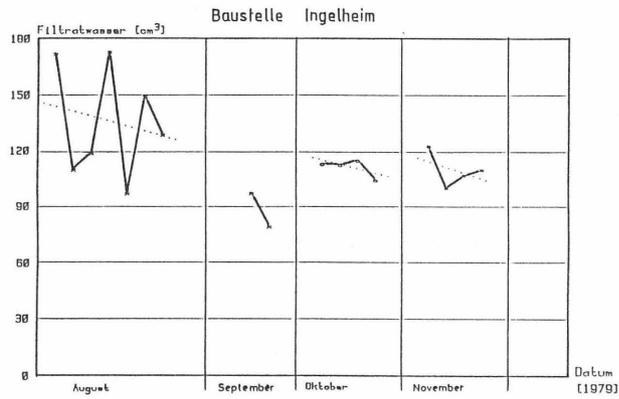


Bild 35: Vergleich der Filtratwasserabgaben eingesetzter Bentonit-Zement-Suspensionen auf den Baustellen Ingelheim und Leverkusen

Bei den 485 hergestellten Lamellen wurde die Untersuchung über den Einfluß der Schlitztiefe auf die Aushubzeit und dem Mehrverbrauch an Suspension auf 3 Bereiche mit je 50 aufeinanderfolgenden Schlitzten beschränkt, wobei innerhalb der Bereiche die Schlitztiefe nahezu konstant war. Beim Aushub der Sekundärlamellen band der Greifer in weiche Dichtwandmasse ein, dadurch verringerten sich die Aushubzeiten bei den Sekundärlamellen um ca. 2 Stunden gegenüber denen der Primärlamellen (Bild 36).

Die Rührversuche im Labor ließen vermuten, daß durch längere Aushubzeiten der Mehrverbrauch an Suspension ansteigen würde. Derartige Abhängigkeiten wurden nicht festgestellt (Bild 37), ebensowenig eine Abhängigkeit von der Schlitztiefe (Bild 38).

Schlitz-Nr.	Primärlamellen			Sekundärlamellen		
	Schlitztiefe	Aushubzeit	Mehrverbrauch	Schlitztiefe	Aushubzeit	Mehrverbrauch
[-]	h [m]	t ^a [h] ^a [min]	f _M [-]	h [m]	t ^a [h] ^a [min]	f _M [-]
1 - 50	25,20	5 40	1,54	25,30	3 58	1,51
100 - 150	27,00	6 32	1,62	27,00	4 15	1,63
320 - 370	19,80	5 3	1,63	19,45	3 23	1,66

$$V_{\text{soll}} = 2,8 \cdot 0,6 \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (\text{Gl.18})$$

Bild 36: Mittelwerte der Schlitztiefen, Aushubzeiten und Mehrverbrauch an Suspension bei Primär- und Sekundärlamellen

Der Mehrverbrauch f_M an Suspension, berechnet aus dem Quotienten von tatsächlich eingebauter Suspensionsmenge V_{ist} und theoretisch einzubauender Menge V_{soll} schwankte zwischen 1,2 und 2,2.

$$f_M = \frac{V_{\text{ist}}}{V_{\text{soll}}} \quad (\text{Gl.19})$$

Der Mehrverbrauch an Suspension beim Aushub der Dichtwandlamellen ergibt sich aus der Gleichung

$$f_M = 1 + V_b \quad (\text{Gl.20})$$

Die Suspensionverluste V_b beim Aushub der Lamellen sind die Summe aus

- Eindringverluste V_e [%]
- Filtratwasserverluste V_f [%]
- Überschneidung der Lamellen $V_{\ddot{u}}$ [%]
- Aushubverluste V_a [%]

und werden reduziert durch den Eintrag von Bodenteilchen, hier ermittelt durch den

Sandeintrag z_s [%]

$$V_b = V_e + V_f + V_{\ddot{u}} + V_a - z_s \quad (\text{Gl.21})$$

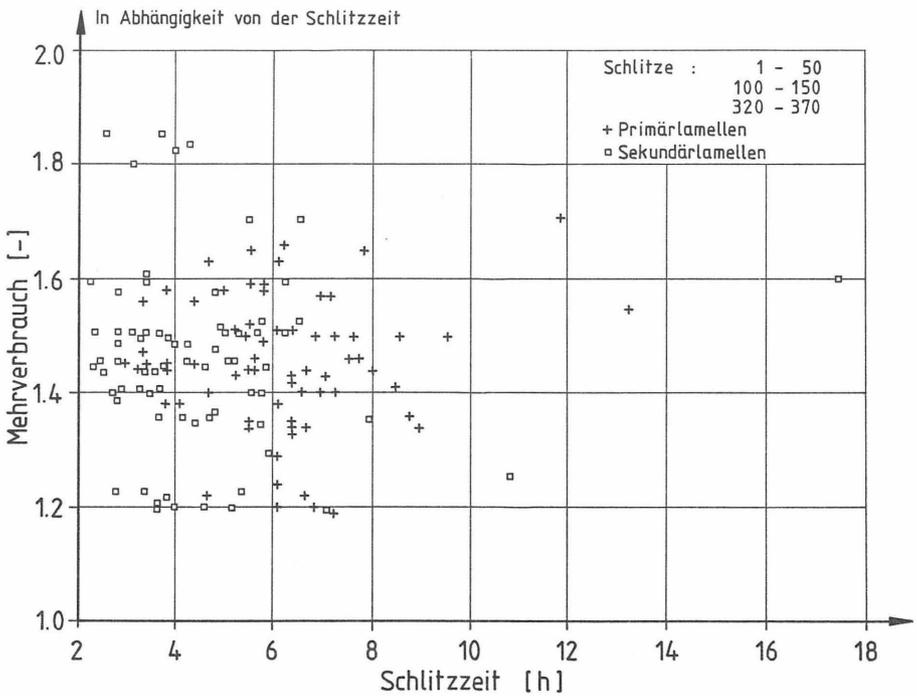


Bild 37: Mehrverbrauch an Bentonit-Zement-Suspension in Abhängigkeit von der Aushubzeit

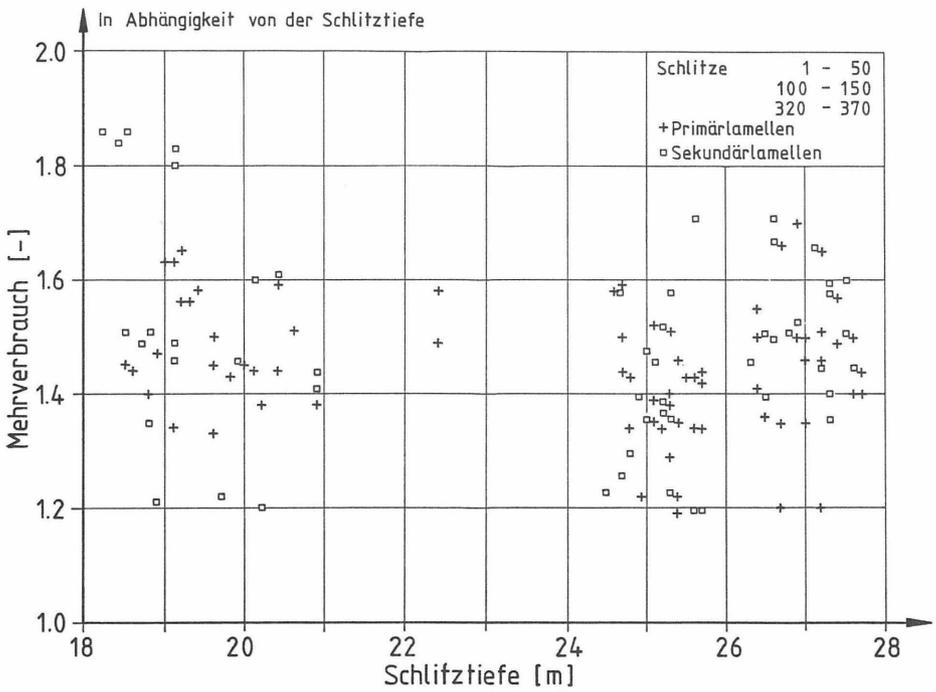


Bild 38: Mehrverbrauch an Bentonit-Zement-Suspension in Abhängigkeit von der Schlitztiefe

Unter der Annahme, daß die Bentonit-Zement-Suspensionen ähnliche thixotrope Eigenschaften wie die Bentonitsuspensionen haben, da aufgrund des hohen Wasserzementfaktors der Zement während des Aushubs noch nicht erstarrt, sind die Eindringverluste V_e von der Fließgrenze der Suspension, ihrer Wichte, der Druckdifferenz Δ_p längs der Eindringtiefe s , dem d_{10} des anstehenden Bodens und dessen Porenanteil n abhängig.

$$f_{so} = \frac{2 \cdot \tau_F}{d_{10}} \quad (\text{Gl.22})$$

τ_F = Fließgrenze der Suspension (N/m^2)

d_{10} = maßgebende Korngröße des Bodens bei einem Siebdurchgang von 10 % (mm)

h_1 = Flüssigkeitshöhe der Suspension [m]

h_2 = Flüssigkeitshöhe des Grundwasser [m]

γ_F = Wichte der Suspension [kN/m^3]

γ_w = Wichte des Wassers [kN/m^3]

f_{so} = Druckgefälle [kN/m^3]

$$\Delta_p = f(\gamma_F) \quad (\text{Gl.22})$$

$$\tau_F = f(\gamma_F) \quad (\text{Gl.24})$$

$$s = \frac{\Delta_p}{f_{so}} \quad (\text{Gl.25})$$

$$V_e = f(\tau_F, \gamma_F, \Delta_p, d_{10}, n) \quad (\text{Gl.26})$$

$$V_e = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (s + s_{i-1}) \cdot h_i \cdot n_i + V_{soll}}{V_{soll}} - 1 \quad (\text{Gl.27})$$

Die Filtratwasserabgaben f und die daraus entstehenden Verluste V_f hängen nach eigenen Messungen von der Aushubzeit t_a , dem Bentonitgehalt in der Suspension und dem Druck Δ_p ab (Bild 33). Hohe Filtratwasserabgaben erhöhen die Wichte der Suspension und den Druck, der gleichzeitig die Eindringung der Suspension vergrößert.

$$V_f = f(t_a, \text{Bentonitgehalt}, \Delta_p) \text{ Bemessung nach Bild 31} \quad (\text{Gl.28})$$

Die Verluste $V_{\ddot{u}}$ durch Überschneidung der Lamellen und Aushubverluste V_a sind nahezu feste Größen. Aushubverluste sind nach Messungen von Carl und Strobl (1980) mit 25 % anzusetzen.

Eine in der Praxis häufig angewandte Näherungsformel gibt für Dichtwände in Sanden und Kiesen die Verluste wie folgt an:

$$V_{eN} = f(S_N) \quad [\%] \quad (\text{Gl.29})$$

$$S_N = \frac{\Delta_p \cdot d_{10}}{3,5 \cdot \tau_F} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl.30})$$

$$V_f = 45 \% \quad (\text{Gl.31})$$

$$V_a = 20 \% \text{ des Porenvolumens im Greifer } n = 30$$

$$V_a = \frac{n \cdot 20}{100} = 6 \% \quad (\text{Gl.32})$$

$$z_s = 20 \% \quad (\text{Gl.33})$$

Näherungsformel

$$V_{bN} = V_{eN} + 45 + V_{\ddot{u}} + 6 - 20 \quad [\%] \quad (\text{Gl.34})$$

$$V_{bN} = V_{eN} + V_{\ddot{u}} + 31 \quad [\%]$$

$$V_{eN} = 0,57 \cdot V_e \quad (\text{Gl.35})$$

Nach 24 Stunden Standzeit verringerte sich das eingebrachte Suspensionsvolumen um $V_f' = 12\%$. Mit den ermittelten Meßwerten der Suspension beim Einbau wurden für 2 Bohraufschlüsse die Eindringlängen S_e und die Eindringverluste V_e berechnet (Bild 39). Die Eindringverluste sind direkt proportional dem d_{10} -Wert des anstehenden Bodens und der Tiefe. Da die vorliegenden Bodenaufschlüsse nur bis 17,35 m reichen, die Lamellen aber bis 27,50 m Tiefe hergestellt wurden, ergeben sich in der Rechnung für 27,50 m Tiefe etwa die doppelten Verluste bei gleichen d_{10} -Werten.

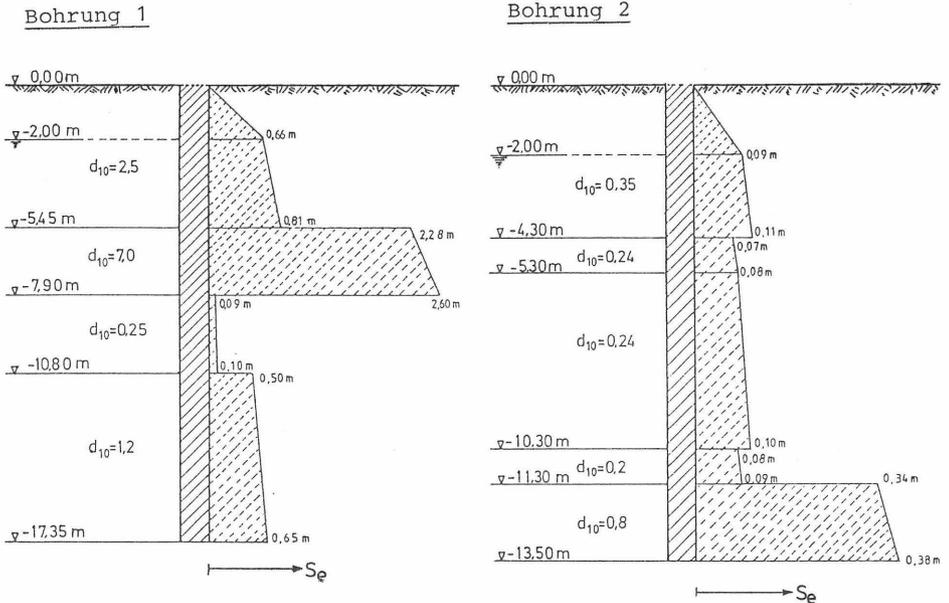


Bild 39: Eindringung der Bentonit-Zement-Suspension in den Baugrund (Baustelle Leverkusen)

Messwerte	Annahmen	Bohrung 1	Bohrung 2
	$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ (DIN 4127)	$h = 17,35 \text{ m}$	$h = 13,50 \text{ m}$
$\tau_F = 44 \text{ N/m}^2$	$n = 20 \%$	$h_w = 15,35 \text{ m}$	$h_w = 11,50 \text{ m}$
$\gamma_F = 11,6 \text{ kN/m}^3$			
		$V_e = 50 \%$	$V_e = 9 \%$
$V_f' = 12 \%$			

Berechnung der Filtrations- und Eindringverluste nach Bild 39.

Der Mehrverbrauch an Suspension durch Filtratwasserabgaben und Eindringung der Suspension in den Boden war bei den Primär- und Sekundärlamellen annähernd gleich, wie die Meßwerte benachbarter Lamellen zeigen (Bild 40a,b+c). Lediglich wo die Werte der Primärlamellen über mindestens 2 Lamellenbreiten ein Maximum erreichten, war bei den im Abstand von 2-4 Tagen später ausgehobenen Sekundärlamellen ein Minimum der Eindringverluste zu verzeichnen. Aus den vorliegenden Meßwerten, Sandgehalt, Dichte und Tiefe wurde für 8 Lamellen die Summe für Eindring- und Aushubverluste ermittelt (Bild 40).

Der Vergleich auf der Baustelle gemessener und hier berechneter Verlustwerte (Bilder 41 und 42) zeigt, daß Bentonit-Zement-Suspensionen weitaus geringer in den Baugrund eindringen, als dies nach Gleichung 22 bis 27 und 34 berechnet wird.

Die Erklärung liegt in der gegenüber Bentonitsuspensionen zeitabhängigen höheren Filtratwasserabgabe der BZS, die zu einer verstärkten Filterkuchenbildung an der Grenzschicht Boden/Suspension führt. Dies erklärt auch die minimalen Verlustunterschiede zwischen Primär- und Sekundärlamellen, obwohl die unfiltrierte Umfangsfläche der Sekundärlamellen bereits durch Herstellung der Primärlamellen um 30 % vermindert wurde.

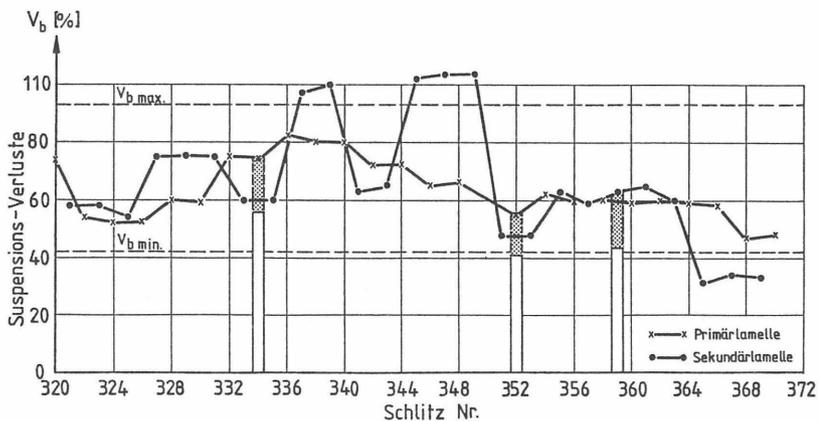
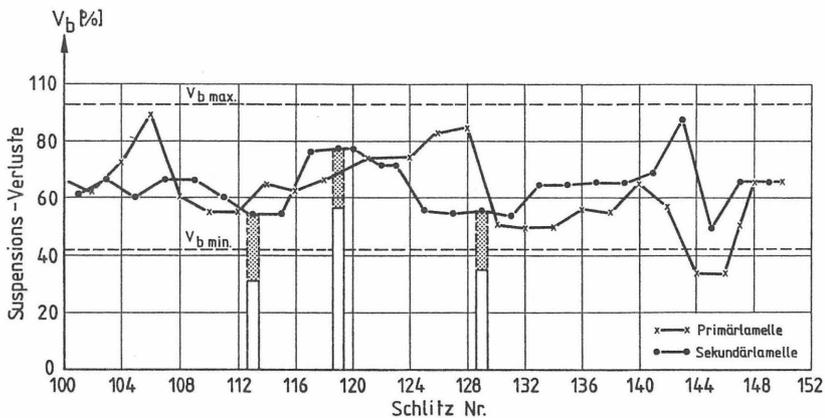
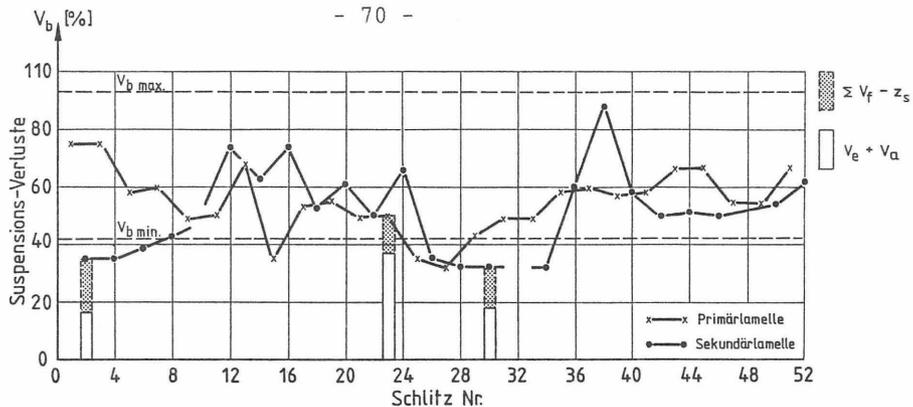


Bild 40: Verlustbilanzen bei Primär- und Sekundärlamellen

V_f = Filtratwasserverluste V_e = Eindringverluste
 z_s = Sandeintrag V_a = Aushubverluste

Verluste Schlitz Nr.	Schlitz Nr. 1 - 50			Schlitz Nr. 100 - 150			Schlitz Nr. 320 - 370		
	Primär- lamellen P	Sekundär- lamellen S	Anzahl der Meßwerte	Primär- lamellen P	Sekundär- lamellen S	Anzahl der Meßwerte	Primär- lamellen P	Sekundär- lamellen S	Anzahl der Meßwerte
Verlustbilanz $V_b = V_e + V_a + V_f + V_f' - z_s$ V_b [%]	54,0	51,0	25 P 25 S	62,0	63,0	25 P 25 S	63,0	66,0	25 P 25 S
Filtratwasser- verluste V_f [%] n. Bild 31 V_f' [%]	14,8	14,0	25 P 25 S	16,0	14,5	25 P 25 S	14,5	13,5	25 P 25 S
Sandeintrag z_s [%]	9,2	9,2	20	9,2	9,2	20	9,2	9,2	20
Eindring- und Aushubverluste $\sum V_e + V_a$ [%]	36,4	34,2		43,2	45,7		45,7	49,7	

Bild 41: Berechnung der Eindring- und Aushubverluste

Verluste	Formel	Meßwerte	Bohrung 1 Schlitz Nr. 1 - 50 100 -150	Bohrung 2 Schlitz 320-370
Eindringverluste v_e [%]	$2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (s_i + s_{i-1}) \cdot h_i \cdot n_i + v_{soll}$		50	9
v_{eN} [%]	Näherungsformel $0,57 \cdot v_e \text{ mit } f_{s0} = \frac{3,5 \cdot \tau_F}{d_{10}} \text{ kN/m}^3$		28,1	5,1
Aushubverluste v_a [%] v_{aN} [%]		25 % Carl/Strobl 6 % für Sande/Kiese	25 6	25 6
Filtratwasserabgabe v_f [%] $v_{f'}$ [%] v_{fN} [%]		$v_f = f(t_a, \text{Bentonitgehalt}, \Delta p)$ n. Bild 31 Verlust nach Beendigung des Aushubs Baustellenmessungen 45 % Sand/Kiese	13 12 45	14 12 45
Sandeintrag z_s [%] z_{sN} [%]		9,2 % Sande/Kiese Mittelrhein 20 % Oberrhein 20,0 %	9,2	9,2 20
Verlustbilanz v_b [%] v_{bN} [%]	$v_b = f_M - 1$ $v_b = v_e + v_a + v_f + v_{f'} - z_s$		P 62 S 63 90,8	P 63 S 66 50,8
	$v_{bN} = v_{eN} + v_{aN} + v_{fN} - z_{sN}$		59,1	36,1

P Primärlamellen
S Sekundärlamellen

Bild 42: Ermittlung der Suspensionsverluste

Die Summe der Eindring- und Aushubverluste betragen etwa 30 bis 50 % der Gesamtverluste, d.h. die Aushubverluste waren weitaus geringer als 25 %, die von Carl/Strobl (1976) gemessen wurden.

Baustellenmessungen an den Bentonit-Suspensionen ergaben im Vergleich zu den Labormessungen

- geringere Filtratwasserabgaben
- auffällige Viskositätsunterschiede, ermittelt durch die Auslaufzeiten aus dem Marshtrichter. Die Auslaufzeiten waren um 20 bis 30 Sekunden höher.

Durch Vergleichsmessungen konnte nachgewiesen werden, daß dies auf die Temperatur (60 - 80°C) des frisch angelieferten Zementes zurückzuführen war (Bild 43).

Die Filtratwasserverluste V_f sind nach dem Aushubende noch nicht abgeschlossen. Es handelt sich um einen zeitabhängigen Vorgang, der nicht auf Sedimentation zurückzuführen ist, da kein Wasser auf der Oberfläche der Suspension in den Lamellen stand. Der Verlust ist bei Drücken zwischen 0,5 und 1,1 bar konstant (Bild 44). Die Ergebnisse der Labormessungen (Rührversuche) stimmen sehr gut mit den Meßergebnissen der Baustellen überein.

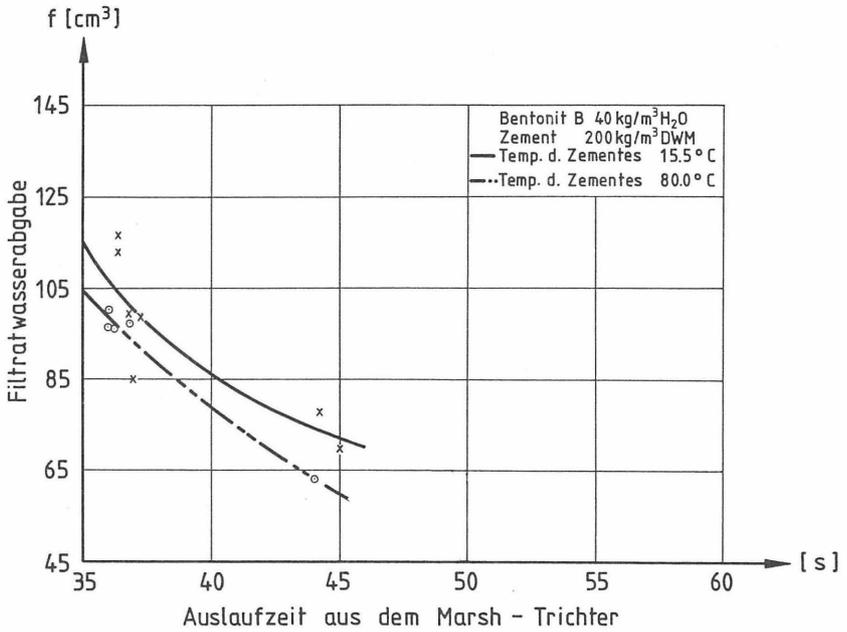


Bild 43: Einfluß der Zementtemperatur auf Filtratwasserabgaben und Auslaufzeiten von Bentonit-Zement-Suspensionen

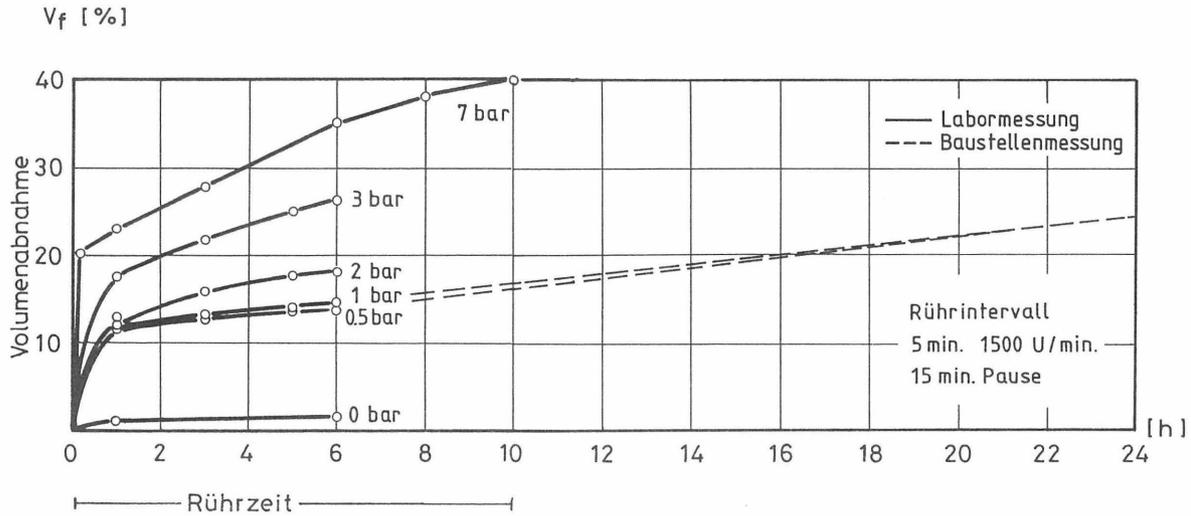


Bild 44: Zeitabhängige Filtratwasserverluste (Labor- und Baustellenmessungen)

6.3 Zusammenfassung

Die Meßergebnisse auf den Baustellen brachten in Hinblick auf spätere Laborversuche wichtige Anhaltspunkte bezüglich der Einhaltung der Quellzeit von 2 Stunden für Na-Bentonitsuspensionen. Die Veränderungen der physikalischen Eigenschaften der BZS zwischen Mischanlage, Zulaufrohr und in der Dichtwandlamelle müssen berücksichtigt werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei die zeitabhängige Filtratwasserabgabe der BZS, die zum einen den Verlustfaktor an BZS bei der Herstellung und die mechanischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit und Durchlässigkeit beeinflusst. Die Vergleichsrechnungen über den Mehrverbrauch an Suspension bei 150 Lamellen zeigten, daß dieser vor allem auf Aushub- und Eindringverluste zurückzuführen ist. Der bei schneller Anlieferungsfolge oft mit hoher Temperatur angelieferte Zement verringert die Filtratwasserabgabe und erhöht die Viskosität der BZS auf der Baustelle.

Die in Kapitel 2 und 4 aufgeführten physikalischen und chemischen Eigenschaften der BZS sowie Ergebnisse aus den Baustellenmessungen (Bild 45) ergeben das in Bild 46 dargestellte Ablaufdiagramm für notwendige Versuche einsetzbarer BZS.

Baustelle	Leverkusen	Ingelheim
Untersuchungen	Ergebnisse	Ergebnisse
Einfluß der Quellzeit der Bentonitsuspension auf Druckfestigkeit und Durchlässigkeit		optimale Quellzeit 2 Stunden
zeitliche Entwicklung von Auslaufzeit Fließgrenze	Schwankungen Anstieg Auslaufzeiten durch erhöhte Zementtemperatur	Schwankungen
Filtratwasserverluste	zeitabhängige Zunahme Aushubphase f (Aushubzeit, Bentonitgehalt und Druck) Aushubende weiterer Anstieg Bestimmung durch Filtratwasserabgaben in Abhängigkeit der Rührzeit in Laborversuchen	
Suspensionsverluste	<u>unabhängig</u> von Aushubzeit und -tiefe Primär- und Sekundärlamelle <u>abhängig</u> von Aushubverlusten Eindringverlusten Filtratwasserverlusten	geringe Eindringung
Filtratwasserabgabe	Schwankungen Verringerung durch erhöhte Zementtemperatur	Filtratwasserabgaben nach Aushubende Anstieg mit Greiferbewegungen
Sandgehalt Dichten in der Dichtwand Wassergehalt		Bodeneintrag Anstieg durch Filtratwasserabgaben Abfall höhere Druckfestigkeiten geringere Durchlässigkeiten
Druckfestigkeit		abhängig von Lagerungstemperatur
Durchlässigkeit		Verringerung mit zunehmendem Probenalter
Beständigkeit		keine Schädigung bei zweijähriger Lagerung und Durchströmung mit sehr betonaggressivem Sickerwasser

Bild 45: Überblick Baustellenmessungen und Ergebnisse

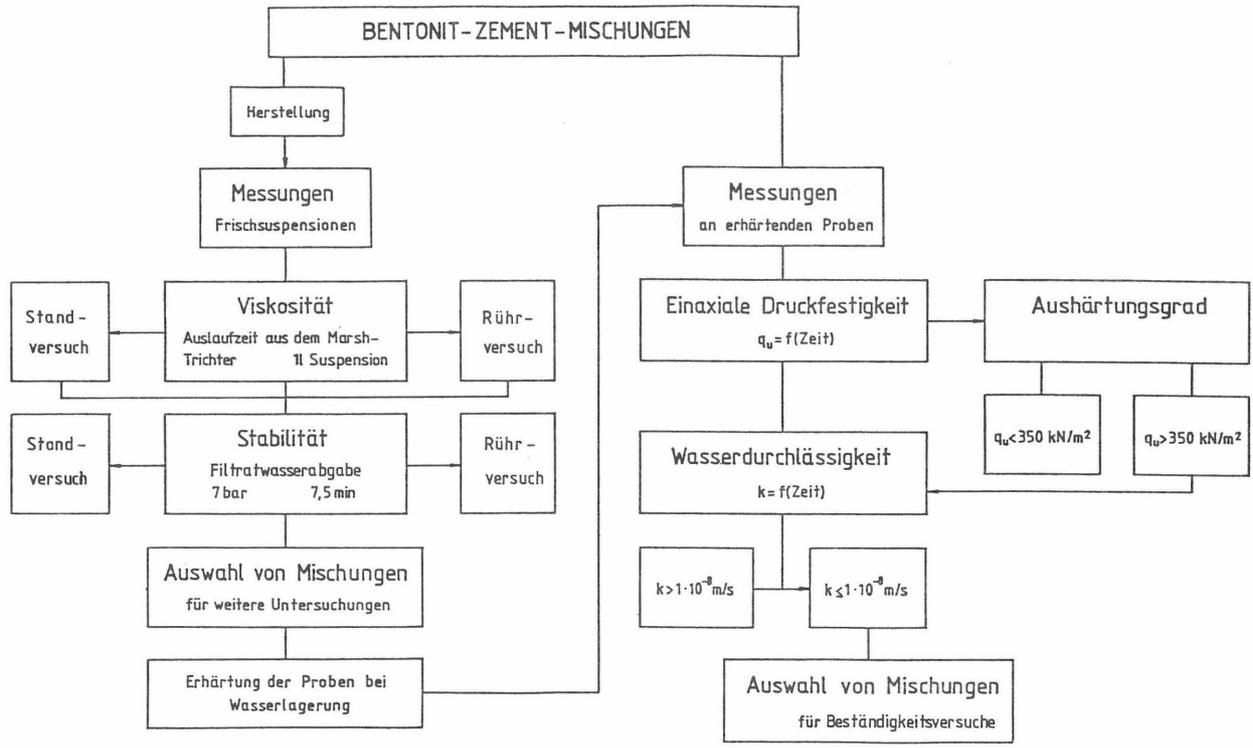


Bild 46: Ablaufdiagramm für notwendige Untersuchungen einsetzbarer Bentonit-Zement-Suspensionen

7 Eigene Laboruntersuchungen

Die theoretische Betrachtung der physikalisch chemischen Eigenschaften der Bentonite und Zemente (Abschnitt 5) sowie vorliegende Ergebnisse führen zu dem nachfolgend beschriebenen Untersuchungsschema (Bild 47). Dieses hat zum Ziel, die wichtigsten zeitabhängigen bentonit-/zementspezifischen Kenngrößen zur Beurteilung und Bemessung der Dichtwandmassen darzustellen.

Kenngröße	Versuchsziele	Versuchsmethode
Viskosität	Zeitabhängigkeit der Viskosität, Abhängigkeit von Rührbewegung und Durchmischung	Marshtrichter, Messung der Auslaufzeiten t_M
Stabilität	Erfassung von Filtratwasserabgaben und Versuchen unter Druck, druckfrei	Filterpresse Messung von Filtratwasserabgaben f Standzylinder
Erstarrungsverhalten Erhärtung	Erfassung des Abbindeverhaltens über alle Phasen. Ursachen und Einflüsse, Abhängigkeiten	Nadelgerät Scherfestigkeiten einaxialer Druckversuch nach DIN 18 136
Durchlässigkeit	Zeitabhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit, Zusammenhänge und Abhängigkeiten	Durchlässigkeitsmessung im Triaxialgerät
Dauerbeständigkeit	Erfassung von Auslaugverhalten bei Durchströmung Änderung von Durchlässigkeit und Festigkeit bei/nach chem. Angriff	Bestimmung von Ausspülraten, Durchlässigkeitsmessungen im Triaxialgerät einaxialer Druckversuch

Bild 47: Untersuchungsprogramm zu ausgewählten BZS-Eigenschaften

In Bild 48 sind die ausgewählten Bentonit- und Zementsorten sowie die Beurteilungskriterien für die Baustoffe aufgezeigt.

Auswahl der Stoffe	Beurteilung	Meßmethode	Meßwerte	ausgewählte Materialien
Bentonitsorte Na-Bentonit	Zementstabilität Ionenaustauschvermögen	Salzzugabe zur Bentonitsuspension	Fließgrenze τ_F (N/m ²) Filtratwasseräbfabe f (cm ³)	Bentonit A B C D
Ca-Bentonit				Bentonit E F' F G M S
Bentonitkonzentration Ca-Bentonit	Wasserbindevermögen Bindungskräfte in Na- und Ca-Bentonit- Suspension	theoretische Betrachtung		
Zementsorte PZ HOZ	Verarbeitbarkeit Druckfestigkeit von Dichtwandmassen	Rührversuche bis 12 Stunden	Auslaufzeit t_M (s) q_u [kN/m ²]	HOZ 35L HOZ 35L-NW/HS

Bild 48 : Beurteilungskriterien und Auswahl von Bentoniten
für die Laboruntersuchungen

7.1 Physikalische Eigenschaften der Na-BZS

Die physikalischen Eigenschaften von BZS wurden durch Messungen der

- Auslaufzeit t_M [s] aus dem Marsh-Trichter
- Filtratwasserabgabe f [cm³] nach DIN 4127
- Fließgrenze τ_F [N/m²] nach DIN 4127

bestimmt. Verglichen werden Ergebnisse aus vorliegenden Laboruntersuchungen sowie eigenen Versuchen. Dabei gilt es, die Zeitabhängigkeit der Kenngrößen von BZS darzustellen.

7.1.1 Zusammensetzung

Für die Auswertung liegen Ergebnisse von BZS unterschiedlicher Zusammensetzung vor (Bild 49), die sowohl im frischen wie auch erhärteten Zustand untersucht und z.T. bei ausgeführten Dichtwänden eingesetzt wurden.

Es sind 3 Na-Bentonite (aktivierte Ca-Bentonite, A, B und C) und eine spezielle Na-Bentonitsorte (akt. Ca-Bentonit D) mit einem sehr geringen Ionenaustauschvermögen. Sie wurden mit Wasser hochtourig zu Bentonitsuspensionen gemischt, denen nach 2 Stunden Quellzeit 5 Hochofenzemente (HOZ 35 L und HOZ 35 L NW/HS) aus verschiedenen Werken mit unterschiedlichen Hochofenschlacke-Anteilen (50 bis 72 M.-%) zugemischt wurden.

Die Bentonitkonzentrationen bereits vorhandener Laboruntersuchungen betragen 30 bis 40 kg Bentonit pro m³ Wasser. Für die speziell für Abdichtungszwecke ausgewählten Dichtwandmassen wurden die Konzentrationen auf 40, 42, 45 und 50 kg pro m³ Wasser erhöht. Die Zementkonzentrationen vorliegender Untersuchungen variierten zwischen 200 und 300 kg pro m³ BZS. Die eigenen Versuche wurden auf Zementkonzentrationen zwischen 150 und 275 kg pro m³ BZS durchgeführt, wobei in Reihenuntersuchungen vor allem die Zementsorten HOZ 35 L mit 50 M.-% und 65 M.-% Hochofenschlacke HOS eingesetzt wurden.

Die Mischungen werden einheitlich mit

Bentonit kg pro m³ Wasser/Zement kg pro m³ DWM

angegeben, z.B. 45/175 entspricht 45 kg Bentonit pro m³ Wasser und 175 kg Zement pro m³ DWM. Diese Darstellung ist so gewählt, um den Einfluß von Zement auf Bentonitsuspensionen mit vergleichbaren Bentonitkonzentrationen zu prüfen und bei der Beurteilung erhärtender BZS immer vergleichbare Zementkonzentrationen zu haben. Der Umfang der einzelnen Versuchsreihen variierte zwischen n = 1 und n = 11, wobei n die Anzahl der BZS mit gleicher Bentonit-Konzentration pro m³ Wasser angibt.

Bentonit kg/m ³ H ₂ O	Zement kg/m ³ D _{VM}	Zementsorten				
		H 50 M.-% HOS	S 55 M.-% HOS	W 65 M.-% HOS	T 70 M.-% HOS	L 72 M.-% HOS
30	125			xx		
	150			x		
	175			x		
	200	●		●		
	225	●			○ ●	
	250	●				
	275	○				
300	○					
350						
35	125			x		
	150			x		
	175			x		
	200	○ ●		●	○	
	225	○				
	250	○				
	275	○				
300	○					
40	125	○				
	150	○	x			
	175	○	x			
	200	○ ●	x	○ ●	○	
	225	○ ●		○ ●		
	250	○ ●		○ ●		
	275	○		○		
300	○		○			
42,5	150		x			
	175					
	200					
	225					
	250					
	300					
45	150	○ x		○ xx	○ xx	○
	175	● x		○ ● xx	○ xx	○
	200	x				
	225		●	○		
	250					
	300					
50	150		x			
	175		x			
	200	●				
	225					
	250					
	300					

○ ● □ vorliegende Ergebnisse
 □ Na-Bentonit A
 ● Na-Bentonit B
 ○ Na-Bentonit C
 x Na-Bentonit D (Spezialbentonit)

Bild 49: Bentonit- und Zementkonzentrationen untersuchter Na-BZS

7.1.2 Einflüsse auf die Viskosität bewegter und unbewegter BZS

7.1.2.1 Zementsorte und -konzentration

Die Viskositätserhöhung durch den Temperaturanstieg ist bereits in Bild 43, Abschnitt 6 wiedergegeben. Der Einfluß der Zementsorte ist in Bild 50 dargestellt. Die Auslaufzeiten, direkt nach dem Mischvorgang ermittelt, fallen mit steigendem HOS-Anteil im Zement ab.

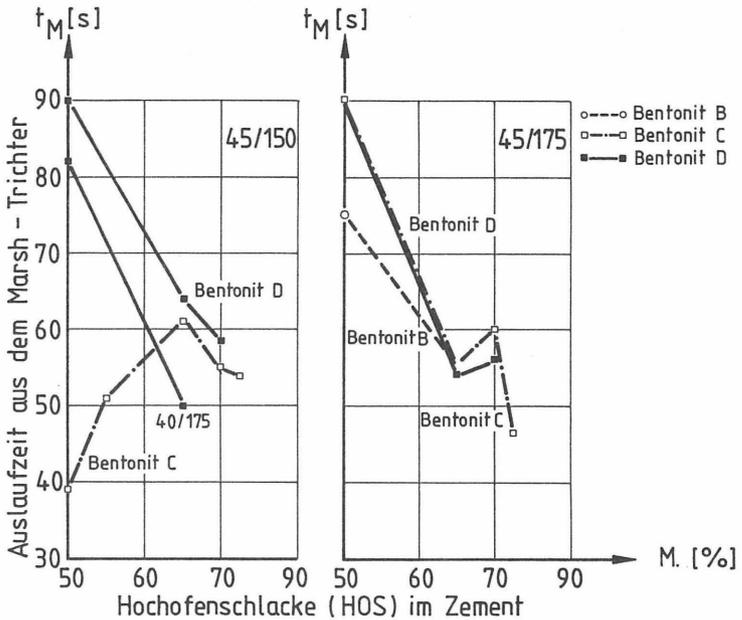


Bild 50: Auslaufzeit in Abhängigkeit vom HOS-Anteil im Zement. Meßwerte nach der Herstellung ermittelt.

Die Bentonitsorte A mit höherem Ionenaustauschvermögen in der Suspension bewirkt geringe Viskositäten. Sie nehmen bei den Bentonitsorten B und C, die nahezu identisches Verhalten zeigen, zu (Bild 51).

Die allgemeine Regel: je höher die Zementkonzentration in der BZS, desto geringer die Bentonitkonzentration in der BZS. Um noch mischfähige und fließfähige Suspensionen zu erlangen, muß nach den vorliegenden Ergebnissen dahingehend korrigiert werden. Die Bentonitsorte und die Zementsorte bestimmen zunächst die Viskosität der BZS nach dem Mischvorgang (Bild 51 und 52). Die Viskosität ändert sich aber mit der Zeit. Je nach Bentonitsorte und Zementsorte werden die BZS steifer oder flüssiger, zunächst unabhängig von der Konzentration.

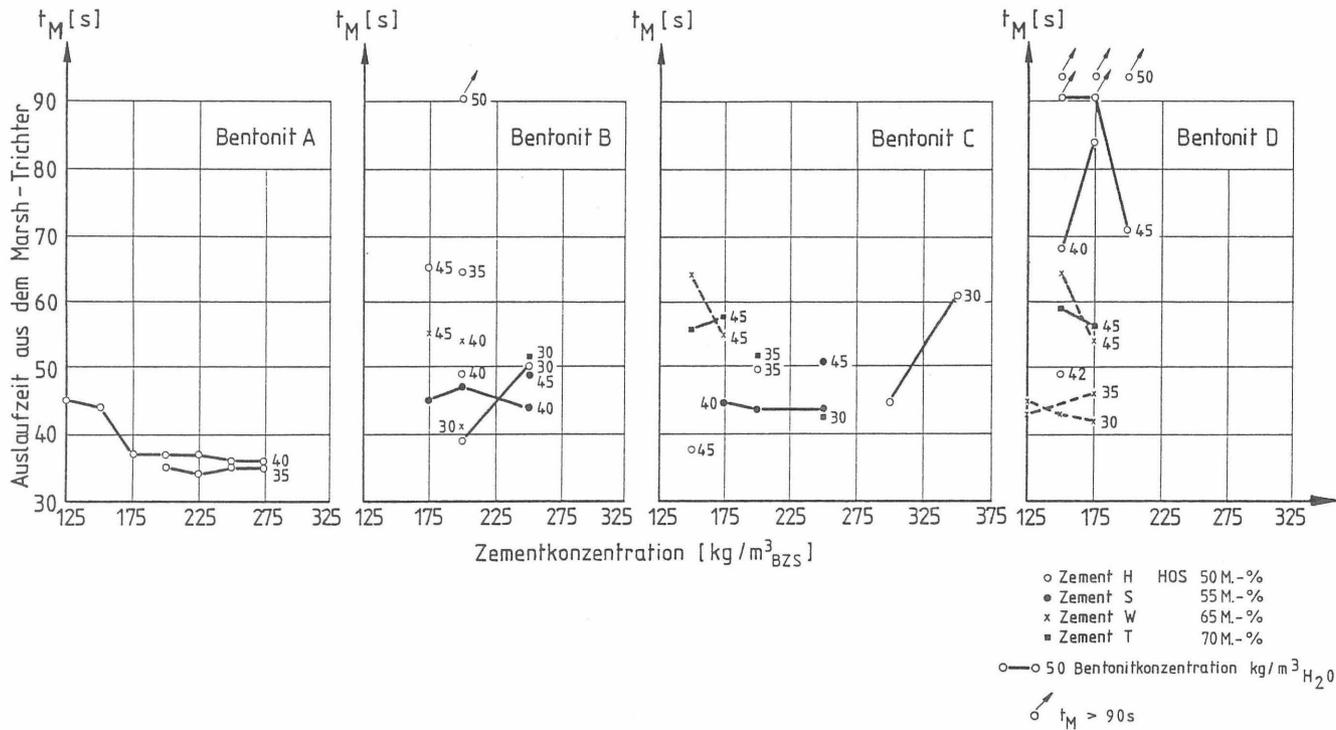


Bild 51: Einfluß der Zementkonzentration und Bentonitkonzentration auf die Auslaufzeiten in Abhängigkeit von Bentonit- und Zementsorten

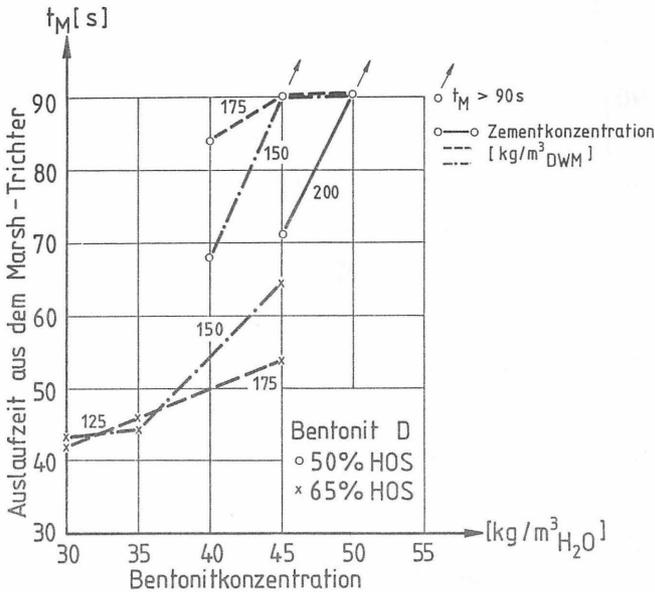


Bild 52: Einfluß der Zementsorte auf die Auslaufzeit in Abhängigkeit von der Bentonit- und Zementkonzentration

7.1.2.2 Bentonitsorten und -konzentration

Bentonite, die aufgrund ihres geringen Ionenaustauschvermögens sehr stabil gegen das im Zement enthaltene Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sind und demnach nur geringfügig in Ca-Bentonit umgewandelt werden (Bentonit D), führen in BZS zu hohen Anfangsviskositäten, die mit steigender Bentonitkonzentration zunehmen. Die hohen Viskositäten werden durch den Einfluß der HOS im Zement zurückgedrängt, der zu einer Verflüssigung führt, die durch die Erhöhung der Zementkonzentration verstärkt wird (Bild 52).

Bei den Bentonitsorten B, C und D, die zementstabil sind, sind BZS mit Bentonitkonzentrationen von 50 kg/m³ Wasser nicht verarbeitbar. Dies ist erst durch den Einsatz eines Bentonits mit höherem Ionenaustauschvermögen (Bentonit (A) gegeben (Bild 53).

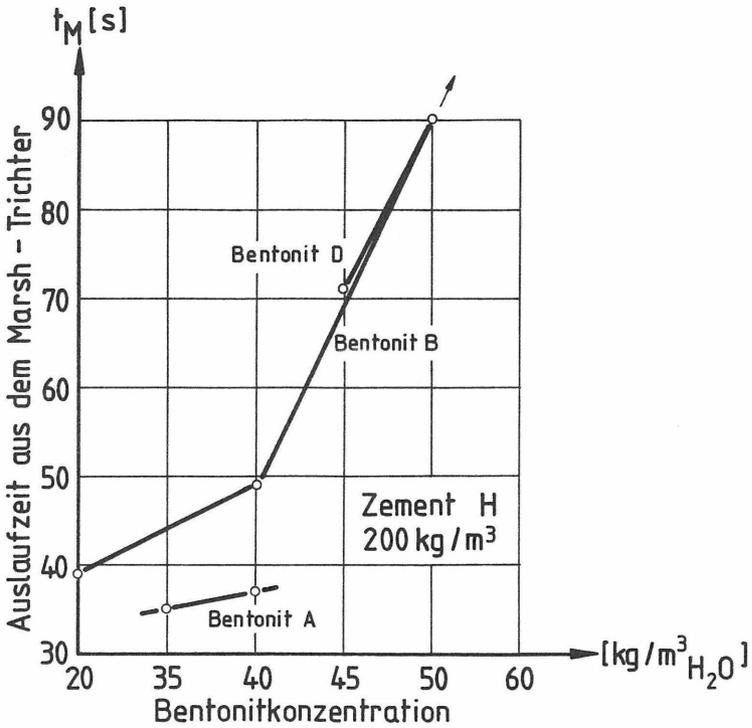


Bild 53: Einfluß der Bentonitsorte auf die Auslaufzeit am Beispiel eines Zementes mit 50 M.-% HOS

Da zur Beurteilung der einzelnen Parameter insgesamt zuwenig Meßwerte pro Bentonit- und Zementsorte und Konzentrationen zur Verfügung standen, wird in Bild 54 qualitativ die Abhängigkeit der Viskosität dargestellt.

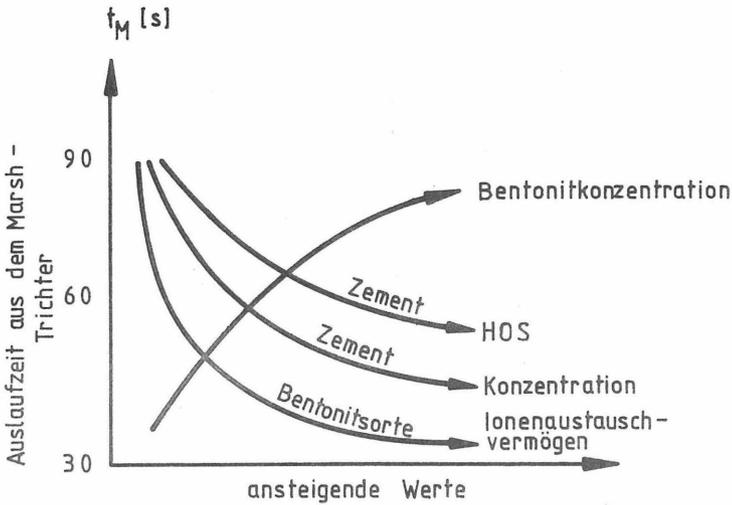


Bild 54: Anstieg und Abfall der Viskosität in Abhängigkeit vom Zement und Bentonit - Ermittlung der Meßwerte t_M nach Herstellung der BZS

Die BZS sollen beim Aushub der Lamellen noch flüssig bleiben, damit sie möglichst rasch aus dem Greifer abfließen können und lange Verarbeitungszeiten garantieren. Die Meßergebnisse sind direkt nach dem Mischen ermittelt. Der Viskositätsverlauf der untersuchten unbewegten und bewegten Suspensionen ist unterschiedlich.

Die Viskosität unbewegter BZS, die den Zustand der in Vorratsbehältern auf der Baustelle befindlichen BZS darstellen, steigt innerhalb einer Stunde rasch an, wobei der nach ca. 30 Minuten zu verzeichnende Anstieg mit zunehmendem HOS-Anteil im Zement verstärkt wird. Die BZS mit geringem HOS-Gehalt haben einen verzögerten Viskositätsanstieg (Bild 55).

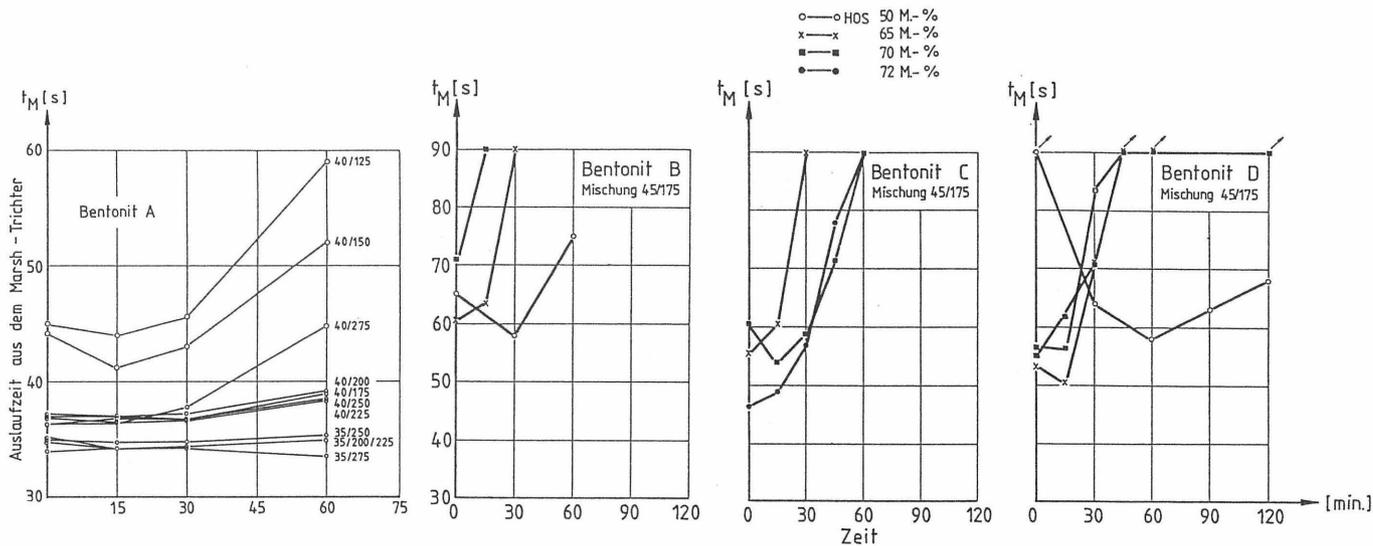
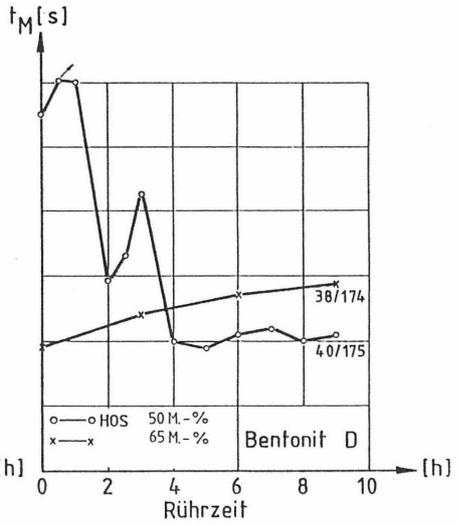
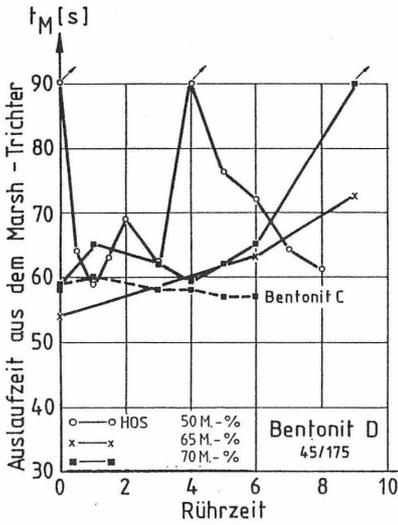


Bild 55: Auslaufzeiten unbewegter BZS als Funktion der Zeit

Die Entwicklung der Viskosität bewegter Suspensionen, die den Zustand der BZS in der Lamelle während der Aushubphase beschreiben, ergibt ein ähnliches Bild. Hier haben die BZS mit der geringen Bentonitkonzentration, geringem HOS-Anteil und höherer Zementkonzentration niedrige Viskositäten. Der in Bild 54 qualitativ dargestellte Einfluß der Zemente und Bentonite ändert sich dahingehend, daß bei unbewegten und bewegten BZS der zunehmende HOS-Gehalt im Zement zu geringeren Anfangsviskositäten bei gleichzeitig stetigen "Ansteifen" führt. Damit werden die Messungen auf der Baustelle Ingelheim (Abschnitt 6.2) bestätigt. Bei den bewegten BZS verursachen höhere Zementgehalte ab 6 Stunden einen geringen Steifigkeitszuwachs, wobei BZS mit geringem Hüttensandanteil im Zement länger verarbeitbar sind (Bild 56).

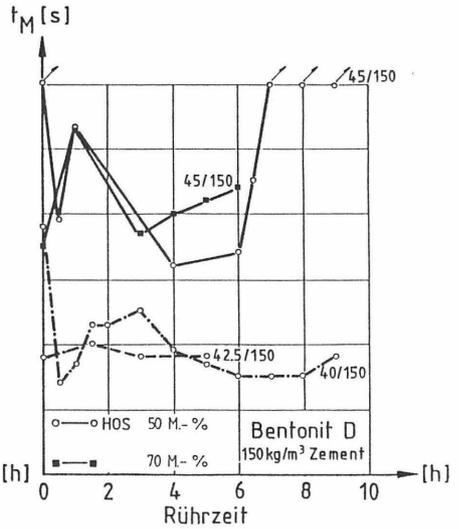
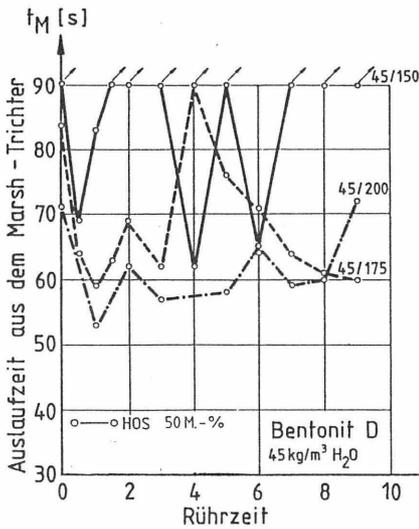
Die Zunahme der Viskosität, wie sie z.B. von Meseck (1981) dargestellt wird, zeigt nur in etwa den Verlauf bei niedriger Bentonitkonzentration und hohem Zementgehalt mit niedrigem HOS-Anteil bzw. hohem Bentonitgehalt, Verwendung einer Bentonitsorte mit geringem Ionenaustauschvermögen und einer Zementsorte mit hohem HOS-Gehalt. Die Veränderung der Viskosität ist in Bild 57 qualitativ dargestellt bei ansteigenden Werten von

- Ionenaustauschvermögen (Bentonit)
- Bentonitkonzentration
- HOS-Anteil (Zementsorte)
- Zementkonzentration



a) gleiches Mischungsverhältnis

b) gleiche Zementkonzentration



c) gleiche Bentonitkonzentration

d) konstante Zementkonzentration und Erhöhung der Bentonitmenge

Bild 56: Auslaufzeiten bewegter BZS in Abhängigkeit von der HOS

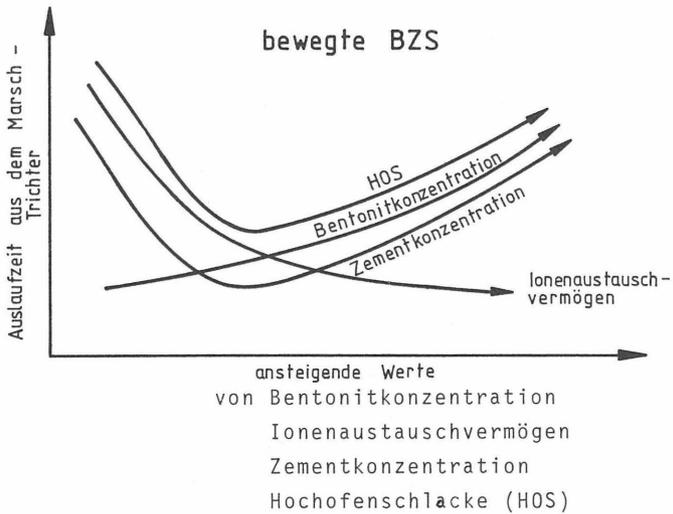
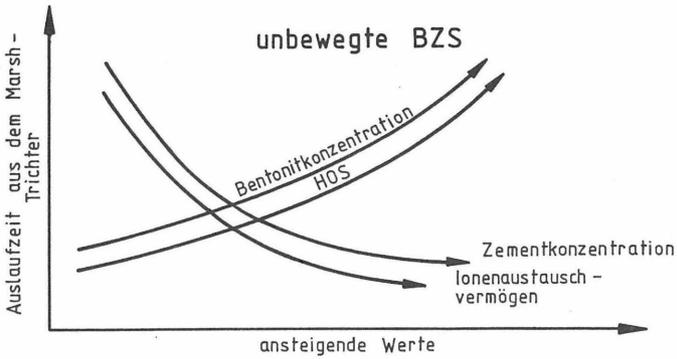


Bild 57: Einfluß der Bentonit-/Zementsorten und -konzentrationen auf unbewegte und bewegte BZS

7.1.2.3 Einfluß von HOS

Die Erklärung für die sehr unterschiedlichen Viskositätsentwicklungen der BZS gleicher Konzentration und gleicher Bentonitsorte ist im Zusammenwirken von Zement und Bentonit zu suchen. Die verwendeten Hochofenzemente bestehen aus Portlandzementklinker, denen zwischen 43 und 72 M.-% HOS zugesetzt ist. HOS erhärtet wie Portlandzement in Klinkerphasen zu den gleichen chemischen Verbindungen, wobei es einer alkalischen Anregung bedarf. Da HOS kalkärmer ist als Portlandzementklinker, enthält er mehr Dicalciumsilicate. Diese erhärten langsamer, es wird weniger Calciumhydroxid abgespaltet.

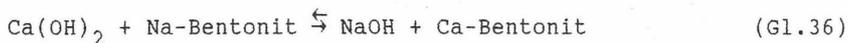
Der Unterschied in den Anfangsviskositäten der BZS beruht deshalb auf den speziellen Eigenarten der Zemente

- Wasserbindevermögen
- Mahlfeinheit
- Gehalt an schnell reagierenden, festigkeitsfördernden Verbindungen.

Ein Zement mit niedrigem HOS-Gehalt enthält mehr Tricalciumsilicat. C_3S ist durch schnelle Erhärtung und große Hydratationswärme gekennzeichnet (s. Abschnitt 5). Der Effekt ist eine "Versteifung" zu Beginn der Zementzugabe, die offenbar der 10 Minuten dauernde Mischvorgang nicht reduziert. Bei der Reaktion des kalkreicheren Tricalciumsilikats wird mehr Calciumhydroxid gebildet. Die Folge ist eine stärkere Sättigung des Wassers mit Calciumhydroxid. Es kommt zu einer verstärkten Umwandlung des Natrium- in den Calciumbentonit. Ein Teil des vom Bentonit gebundenen Wassers wird abgegeben, die Folge ist eine Verflüssigung bzw. Viskositätsabfall. Dieser kann nur durch einen höheren Bentonitgehalt bzw. niedrigen Zementanteil gepuffert werden. Der gleichzeitig auftretende Effekt der Versteifung der Suspension durch das Abbinden des Zementes wird von der Reaktivierung des Bentonits überlagert.

Zemente mit höheren HOS-Gehalten (hier größer gleich 65 %) enthalten mehr Dicalciumsilicat, das bei der Hydratation wenig Calciumhydroxid abspaltet. Es reagiert langsamer, daher sind die Anfangsviskositäten der BZS mit solchen Zementsorten geringer.

Entsprechend der Gleichgewichtskonstanten des Massenwirkungsgesetzes



wird hier weniger Ca-Bentonit gebildet, weshalb die Versteifung der BZS aufgrund der Zementerhärtung stärker ist und die Verflüssigung der Suspension durch die Bildung von Calciumbentonit überlagert wird. Deshalb nimmt die Viskosität unbewegter BZS mit hohem Hüttensandanteil stärker zu und steigt mit fortschreitender Rührdauer im Gegensatz zu den BZS mit geringem Hüttensandanteil stetig an.

In Bild 58 ist die Entwicklung der Viskosität während eines Rührversuches mit einem nicht zementstabilen Bentonit aufgetragen. Die Viskosität dieser BZS steigt innerhalb des Versuchszeitraumes von 10 Stunden minimal. Es tritt demnach eine starke Reaktivierung des Bentonits ein, die das Ansteifen der Suspension durch Abbinden des Zementes verhindert. Bei den BZS mit den Bentoniten B und C und gleicher Zusammensetzung liegen die Viskositäten zu Beginn der Versuche höher und steigen bis zum Alter von 5 Stunden an. Die Viskosität der BZS mit Bentonit B steigt danach weiter an, während die Viskosität der BZS mit Bentonit C kaum zunimmt. Möglicherweise puffert der Bentonit B das sich bildende Calciumhydroxid. Dies erklärt auch den Abfall der Viskosität in Bild 59 bei der Mischung 45/175 mit Bentonit C und 70 % Hüttensand im Gegensatz zu dem Anstieg der Viskosität von der BZS gleicher Zusammensetzung mit Bentonit D.

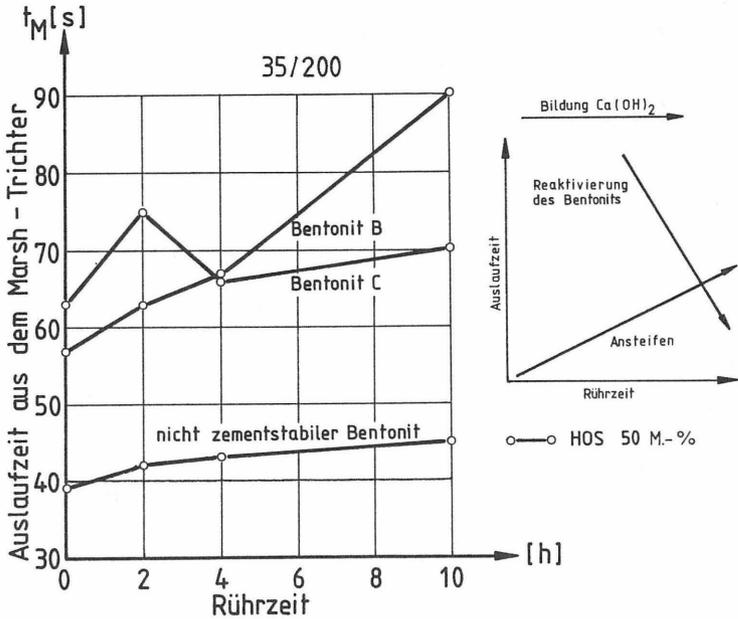


Bild 58: Einfluß der Hydratation (Bildung von Calciumhydroxid) auf die Viskosität, hervorgerufen durch Reaktivierung des Bentonits

Die hier aufgeführten Ergebnisse verdeutlichen: daß allein die Beurteilung der Anfangsviskositäten zu nicht eindeutigen bzw. falschen Schlüssen bei der Beurteilung von fließfähigem BZS führen kann, da sie ohne Kenntnis der Einflüsse von Bentonit- und Zementsorte noch keinerlei Aussage über die Dauer der Verarbeitung zulassen.

Daß die Viskosität der in Ruhestellung befindlichen BZS nach ca. 1 3/4 Stunden ansteigt und nach 3 Stunden noch unter 50 Marsh-Sekunden liegt, wie Caron sie angibt, konnte für die meisten der untersuchten BZS nicht nachgewiesen werden, sie lagen meist über 55 Marsh-Sekunden. Das gleiche gilt für die unter Rührbewegung befindlichen BZS.

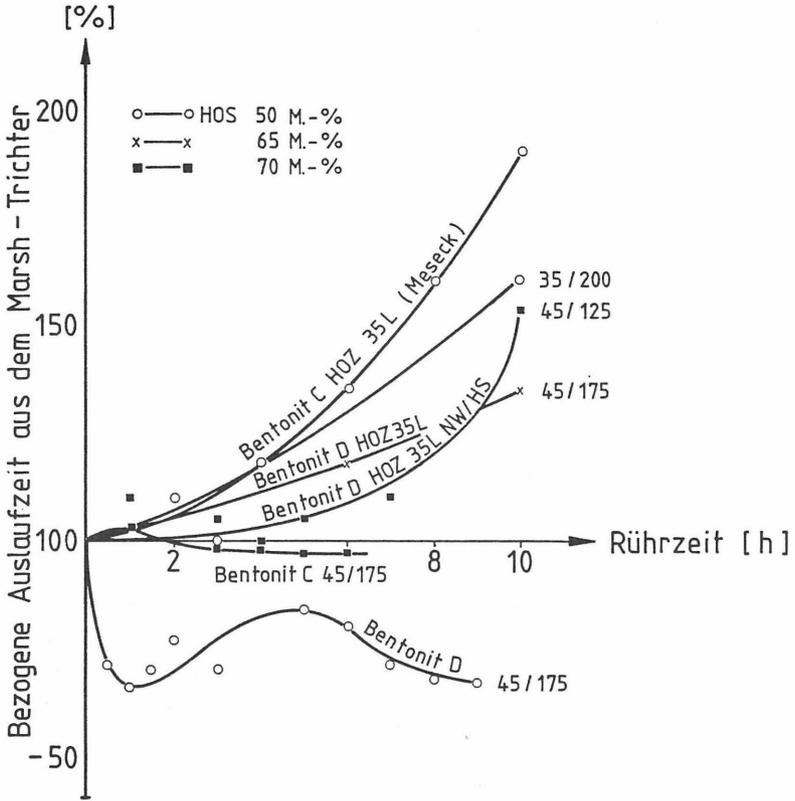


Bild 59: Viskosität von BZS mit unterschiedlichen Bentoniten und Zementen in Abhängigkeit von der Rührzeit

7.1.3 Stabilität

Die Eigenschaft einer Suspension, den Zustand der dispergierten Stoffe über längere Zeit beizubehalten, bezeichnet man als Stabilität. Die Stabilität bzw. Instabilität einer Suspension äußert sich in ihrem Filtrations- und Absetzverhalten.

Die Messung des Absetzmaßes wird mit einem einfachen Standzylinder (250 ml) durchgeführt, in dem nach 24 Stunden Standzeit die abgeklärte Flüssigkeit (Dekandat) gemessen wird.

Die Absetzneigung einer Zement-Suspension ist von dem W/Z-Wert und der Mahlfeinheit des Zementes abhängig (Krenkler, 1980). Für HOZ werden bei $W/Z = 1,4$ Absetzmaße von 29 % angegeben. Durch Beimengung von Bentonit wird dies entscheidend reduziert, wie die Versuche von Caron, 1972, und eigene ergaben.

Der Grund für die Sedimentation ist die höhere spezifische Dichte der festen Teilchen. Im Vergleich zu Bentonitsuspensionen haben BZS höhere Sedimentationsraten, da der Größenunterschied nach Caron 1973 zwischen den Zement- (Durchmesser von 25 bis 100 μm) und den Bentonitkörnern (Durchmesser von 0,2 bis 1 μm) beträgt. Das Absetzmaß ist umgekehrt proportional der Viskosität:

- bei hoher Viskosität verringert sich das Absetzmaß
bei niedriger Viskosität erhöht es sich.

Caron (1973) gibt für BZS mit 4 % Bentonit und V/Z-Faktoren von 0,6 bis 1,0 das Absetzmaß zu 0 % an.

Eigene Versuchsreihen mit W/Z-Faktoren zwischen 3 und 6,2 sowie 3 bis 5 % Bentonit führten zu 0 % Absetzmaß, solange das Bentonit-Zementverhältnis über $B/Z = 0,18$ lag und die Bentonitkonzentration mindestens 40 kg pro m^3 Wasser betrug (Bild 60).

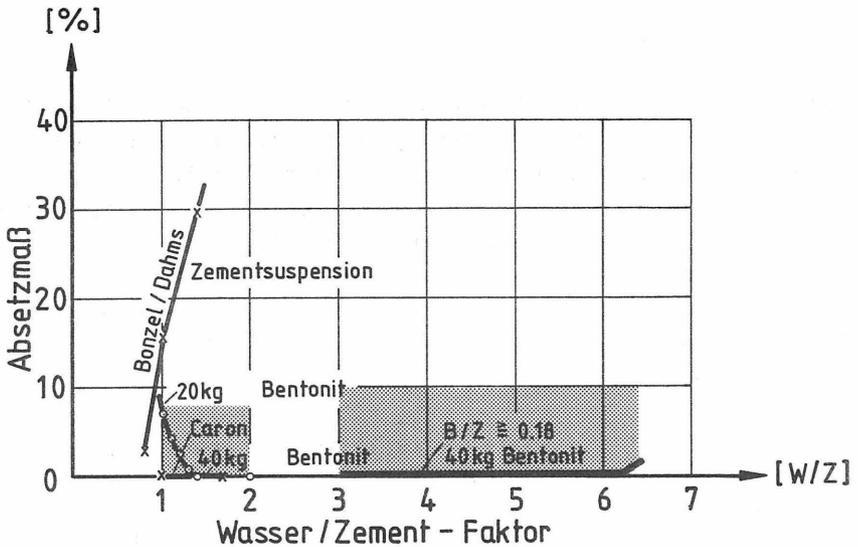


Bild 60: Absetzmaße von Zementsuspensionen und BZS

7.1.4 Filtratwasserabgabe

Filtration ist die Abgabe der flüssigen Phase an einer Grenzfläche unter Druck. Ein Maß für die Filtration ist die Filtratwasserabgabemenge f nach DIN 4127. Das Filtrationsverhalten der BZS bewirkt die Wasserabgabe in den Boden und die Filterkuchenbildung an den Wandungen. Die Filtratwasserabgabe ist neben dem Druck abhängig von

- Bentonitsorte
- Bentonitkonzentration
- Zementsorte
- Zementkonzentration
- Rührbewegungen in der BZS.

7.1.4.1 Bentonitsorte

Bentonite mit geringem Ionenaustauschvermögen und geringen Filtratwasserabgaben in Bentonitsuspension erzeugen auch in BZS die geringeren Filtratwasserabgaben. Insofern wird die These von Caron (1973) bestätigt, daß BZS mit hoher Viskosität die geringsten Filtratwasserverluste haben (Bilder 61 und 62).

SUSPENSIONEN	BENTONITSORTE			
	A	B	C	D
	Filtratwasserabgaben f [cm ³]			
Bentonitsuspension 35 kg/m ³ Wasser	41	35	38	-
Bentonit-Zement-Suspension + 200 kg/m ³ BZS Zement (HOS 50 M.-%)	117,7	54	47	-
Bentonitsuspension 45 kg/m ³ Wasser	-	27	25	21
Bentonit-Zement-Suspension + 175 kg/m ³ BZS Zement (HOS 50 M.-%)	-	43	65	39

Bild 61: Filtratwasserabgaben von Bentonit- und Bentonit-Zement-Suspensionen

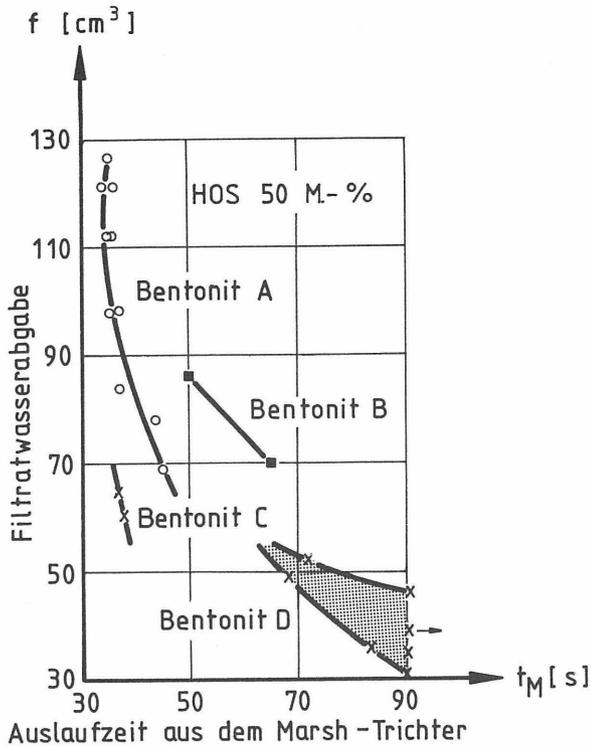


Bild 62: Filtratwasserabgabe als Funktion der Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter und Bentonitort

7.1.4.2 Bentonitkonzentration

Die Filtratwasserabgabe wird von der Bentonitort und -konzentration bestimmt, wobei sich die Filtratwassermenge mit steigender Konzentration verringert (Bild 63).

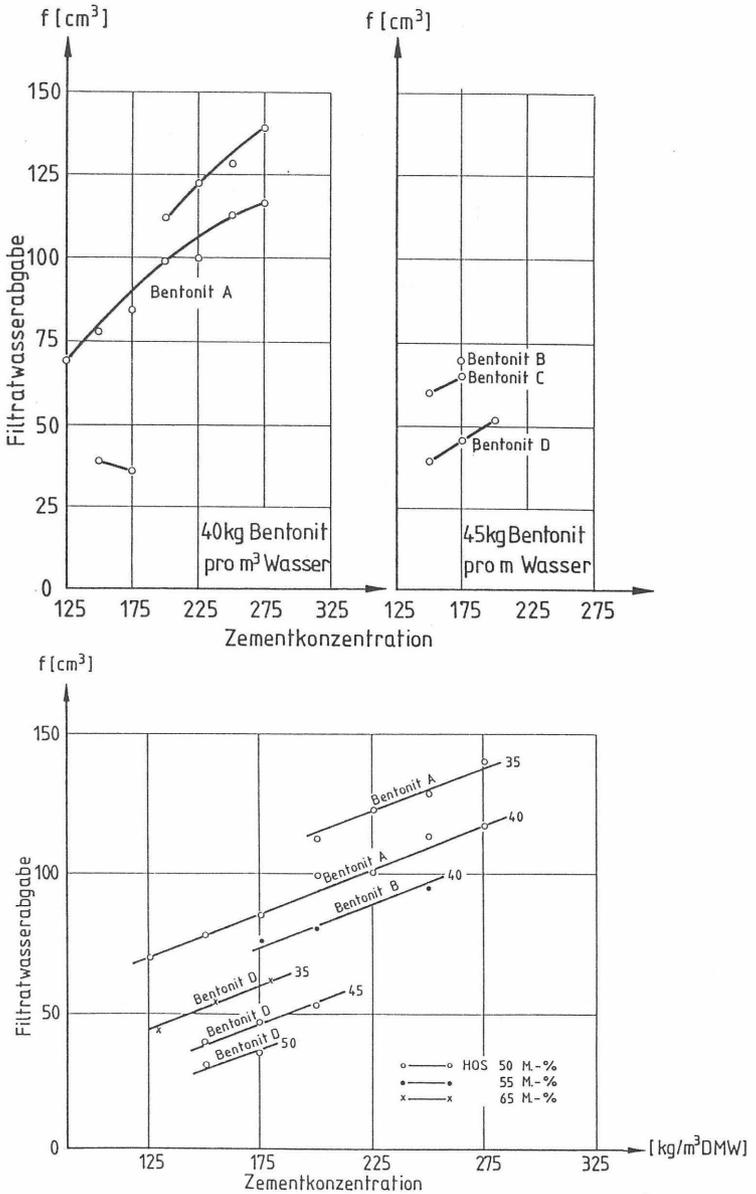


Bild 63: Filtratwasserabgaben in Abhängigkeit von Bentonit- und Zementkonzentration

7.1.4.3 Zementsorte

Die Filtratwasserabgabe ist auch von der Dichtigkeit und Dicke des Filterkuchens abhängig. Reine Bentonitsuspensionen haben wesentlich geringere Filtratwasserabgaben als diese nach Zumischen des Zementes aufweisen (Bild 61).

In der Bentonitsuspension sind die Teilchen in viele sehr dünne Blättchen aufgespalten, die sich bei Druck an der Filterfläche flach übereinander legen, Wasser abgeben und so ein dichtes Gefüge bilden. Dadurch ergibt sich die niedrige Filtratwasserabgabe. Bei Zumischen des Zementes wird der Bentonit teilweise in Ca-Bentonit umgewandelt, der aufgrund seines geringen Wasserbindevermögens bewirkt, daß die BZS mehr Wasser abgibt. Die Zementkörner, die größer als die Bentonitteilchen sind, lockern das Gefüge des Filterkuchens auf. Der Filterkuchen wird durchlässiger. Während des hier betrachteten Untersuchungszeitraumes von 9 Stunden wandeln sich die Zementkörner in sehr kleine Partikel von Zementgel um. Bei der Einwirkung von Wasser auf Zement entstehen an der Oberfläche der Zementteilchen wasserreiche Gelteilchen, die eine zusammenhängende Schicht gallertartiger Masse bilden (Krenkler, 1980). Das Wasser dringt nach innen vor, die Reaktion schreitet fort, wodurch die Gelhülle dicker und das nichthydratisierte Zementteil kleiner wird, bis es sich aufgelöst hat. Da diese Zementteilchen eine geringere Größe als die Zementkörner besitzen, stören sie die Filterkuchenstruktur weniger.

Dagegen liegt die HOS auch nach 6 Stunden Rührdauer noch in unveränderter Größe vor. Daraus folgt, daß je höher der HOS-Anteil eines Zementes ist, der Filterkuchen umso stärker gestört wird und somit die Filtratwasserabgabe steigt.

7.1.4.4 Zementkonzentration

Die Filtratwasserabgabemengen, direkt nach der Herstellung der BZS bestimmt, steigen mit der Zementkonzentration an (Bild 63).

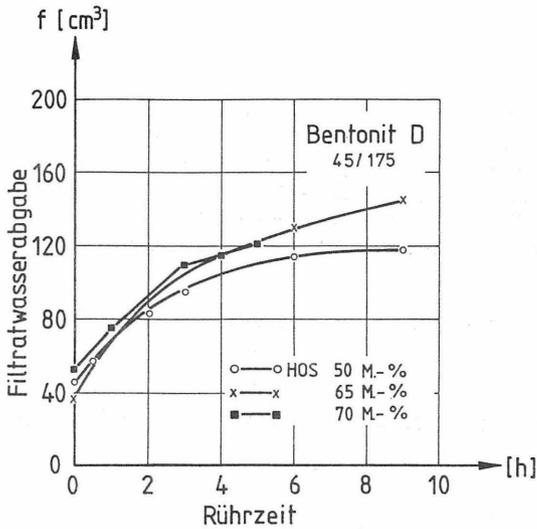


Bild 65: Filtratwasserabgaben als Funktion der Rührzeit bei gleichem Mischungsverhältnis und unterschiedlichen Zementen

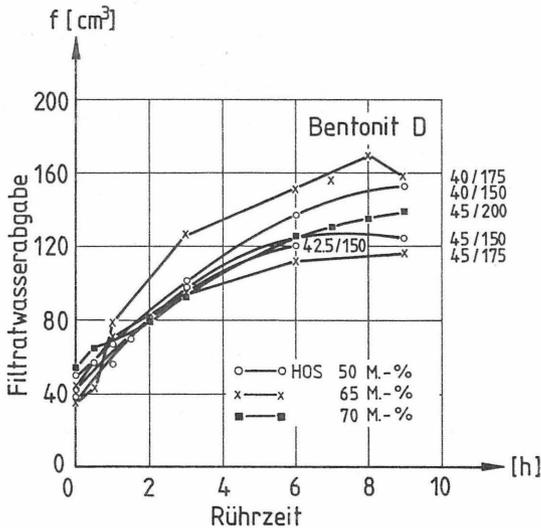


Bild 66: Filtratwasserabgaben als Funktion der Rührzeit in Abhängigkeit von der Bentonit- und Zementkonzentration

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Filtratwasserabgabe mit der Rührzeit zunimmt und somit auch den Suspensionsverlust nach Ende der Aushubarbeiten an den Lamellen erklärt.

7.1.4.6 Veränderung der Filtratwasserabgabe bei Zementzugabe

Bei einer reinen, ausgequollenen Bentonit-Suspension stellt sich unabhängig vom Zeitpunkt der Messung eine nahezu gleiche Filtratwasserabgabe ein. Mischt man jedoch Zement zu und mißt erneut die Filtratwasserabgabe, so kann sich eine bis zu zehnfache Erhöhung der Filtratwasserabgabe ergeben.

Die Erhöhung kann nicht allein auf die gestörte Filterkuchenbildung zurückgeführt werden. Der Bentonit muß auch eine Veränderung seines Wasserbindevermögens erfahren haben. Im folgenden soll daher eine Erklärung der chemischen Vorgänge, die sich bei Zementzugabe in der Suspension abspielen, gegeben werden.

Die der Betrachtung zugrundeliegenden chemischen Gesetzmäßigkeiten sollen kurz erläutert werden.

Das Massenwirkungsgesetz

Eine chemische Reaktion kommt bei einer bestimmten Temperatur äußerlich dann zum Stillstand (= dynamisches Gleichgewicht), wenn der Quotient aus dem Produkt der Konzentration der Ausgangsstoffe und dem Produkt der Konzentration der Reaktionsprodukte einen bestimmten, für die Reaktion i charakteristischen Wert k_i (Dissoziationskonstante) erreicht hat (Ühlein, 1974).

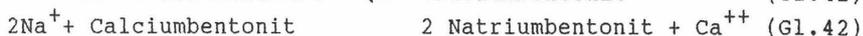
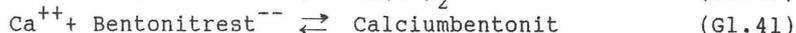
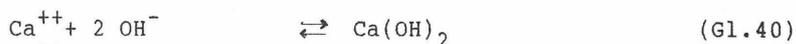
Der Dissoziationsgrad ist das Verhältnis der in einer Lösung dissoziierten Moleküle zur Gesamtzahl der Moleküle. Dabei ist die Beziehung zwischen Dissoziationskonstante k und Dissoziationsgrad a noch von der Konzentration c der Lösung abhängig.

$$\frac{a^2}{1-a} \cdot c = k \quad (\text{Gl. 37})$$

Das Löslichkeitsprodukt L ist die Konzentration der gelösten, undissoziierten Moleküle in einer gesättigten Lösung, die konstant ist.

$$L = k \cdot \text{Löslichkeit} = \text{konstant} \quad (\text{Gl.38})$$

In einer Bentonit-Zement-Suspension laufen vier, für die Filtratwasserabgabe wichtige, reversible Reaktionen ab. Sie sind hier aufgeführt in der Reihenfolge ihres erstmaligen Auftretens nach der Zementzugabe zur reinen Bentonit-Suspension. Danach laufen die Reaktionen gleichzeitig ab.



Als Massenwirkungsgleichungen geschrieben:

$$\frac{[\text{Na}^+] \cdot [\text{Bentonitrest}^-]}{[\text{Natriumbentonit}]} = K_1 \quad (\text{Gl.43})$$

$$\frac{[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{OH}^-]^2}{[\text{Ca(OH)}]} = K_2 \quad (\text{Gl.44})$$

$$\frac{[\text{Ca}^{++}]^2 \cdot [\text{Bentonitrest}^{--}]}{[\text{Calciumbentonit}]} = K_3 \quad (\text{Gl.45})$$

$$\frac{[\text{Na}^+]^2 \cdot [\text{Calciumbentonit}]}{[\text{Natriumbentonit Ca}]^2 [\text{Ca}^{++}]} = K_4 \quad (\text{Gl.46})$$

In einer reinen Bentonitsuspension dissoziiert gemäß Gleichung (39) der Natriumbentonit zu $\text{Na}^+ + \text{Bentonitrest}$.

Die den Bentoniten zugesetzten Zemente enthalten einen gewissen Anteil Calciumoxid, z.B. 0.67 M.-%. Calciumoxid reagiert mit Wasser unter Bildung von Calciumhydroxid. Calciumhydroxid dissoziiert gemäß Gleichung (40) zu $\text{Ca}^{++} + 2\text{OH}^-$.

Da nun Ca^{++} und Bentonitrest nebeneinander gelöst in der Suspension vorkommen, kann sich Calciumbentonit bilden. Entsprechend der Dissoziationskonstante K_3 (Gleichung 45) stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Ca^{++} , Bentonitrest⁻ und Calciumbentonit ein. Der zu Calciumbentonit gebundene Bentonitrest fehlt dann in der Massenwirkungsgleichung (43).

Um wieder zu einem konstanten Gleichgewicht zwischen Na^+ , Bentonitrest⁻ und Natriumbentonit zu kommen, wird Natriumbentonit dissoziiert.

Es befinden sich jetzt aber weniger Natriumbentonit, Na^+ und Bentonitrest in der Lösung als vorher, da bei gleichbleibender Bentonitmenge ein Teil des Natriumbentonits in Calciumbentonit umgewandelt wurde.

Nach Freundlich (1932) ist der Dissoziationsgrad α von Natriumbentonit größer als der von Calciumbentonit. Da die Konzentration c gleichgeblieben ist, und ein Teil des Natriumbentonits in Calciumbentonit umgewandelt wurde, ist somit die Gesamtzahl der von den Bentoniten abdissoziierbaren Kationen kleiner geworden.

Kationen hydratisieren in einer wässrigen Lösung, wie sie die Suspension darstellt, d.h. sie ziehen durch elektromagnetische Wechselwirkung Wasserdipole an. Die Wassermoleküle bilden dabei eine Art Hülle um das Kation. Sie sind dann nicht mehr frei beweglich und können somit nicht mehr ausgepreßt werden. Je mehr hydratisierte Kationen in der Suspension vorkommen, desto geringer ist die Filtratwasserabgabe. Umgekehrt ergibt sich dann, daß

durch die Umwandlung von Natriumbentonit in Calciumbentonit die Anzahl der Kationen kleiner geworden ist, der Hydratationsgrad geringer ist und mehr Wasser ausgepreßt werden kann, die Filtratwasserabgabe also steigt.

Die Umwandlung von Natriumbentonit in Calciumbentonit und die damit verbundene erhöhte Filtratwasserabgabe wird im weiteren noch durch die Hydratation des Zementes verstärkt. Bei der Reaktion der Calciumsilikate des Zementes mit Wasser wird bei Bildung von Calciumsilikathydraten auch Calciumhydroxid frei. Gemäß Gleichung (40) dissoziiert das Calciumhydroxid in $\text{Ca}^{++} + 2\text{OH}^-$. Da Na-Ionen und Calciumbentonit und Ca-Ionen und Natriumbentonit nach Massenwirkungsgleichung (46) in einem festen Verhältnis zueinander stehen, wird durch die Erhöhung der Ca-Ionenkonzentration der Nenner größer. Die Reaktion nach Gleichung (42) läuft dann nach links ab, um das Gleichgewicht wieder herzustellen. Es wird also zu Lasten des Natriumbentonits Calciumbentonit gebildet, was, wie oben beschrieben, zu einer erhöhten Filtratwasserabgabe führt.

Es kann nicht beliebig viel Natriumbentonit in Calciumbentonit umgewandelt werden, wie ja auch die Versuche zeigen, da die Filtratwasserabgabe einen endlichen Maximalwert erreicht. Die Grenze ist die Löslichkeit, die die Menge eines Stoffes in einer gesättigten Lösung bestimmt. Wird die vorhandene Stoffmenge größer als die Löslichkeit, so setzt sich die Überschussmenge ungelöst ab. Gemäß Gleichung (38) ist die Konzentration der gelösten, undissoziierten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Moleküle konstant.

$$L = (\text{Ca}^{++}) \cdot (\text{OH}^-)^2 = k \cdot [\text{Löslichkeit } (\text{Ca}(\text{OH})_2)] = \text{konstant} \quad (\text{Gl.47})$$

Das Löslichkeitsprodukt von Calciumhydroxid beträgt bei 25°C:

$$L = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ Mol/l} \quad (\text{Gl.48})$$

Da aber in einer gesättigten Lösung für die Konzentration von Ca^{2+} und OH^- gilt:

$$[\text{Ca}^{2+}] = [\text{OH}^{-2}] \quad (\text{Gl.49})$$

ist auch die Menge der gelösten Ca-Ionen in der Suspension nach oben begrenzt. Somit hat auch die Menge des bildbaren Calciumbentonits und die Zurückdrängung der Dissoziation der Calciumbentonite eine Grenze.

Zu dem Zeitpunkt, wo die Konzentration des Calciumhydroxids die Löslichkeit erreicht, bleibt die Filtratwasserabgabe konstant. Durch die Hydratation des Zementes gebildetes, überschüssiges Calciumhydroxid kristallisiert aus der Lösung aus.

7.1.5 Fließgrenze

Nach DIN 4126 bzw. 4127 wird die Scherfestigkeit von Bentonit-suspensionen als Fließgrenze τ_F [N/m^2] bezeichnet. Ähnlich wie bei der Auslaufzeit t_M , die einen Kennwert für die komplexen Eigenschaften aus Dichte, Viskosität und Scherfestigkeit [Ruppert, 1980] darstellt, ist die Fließgrenze von BZS eine wichtige Kenngröße für das Fließverhalten dieser Suspensionen.

Aus der Fließgrenze kann abgelesen werden, ob die noch nicht erstarrte Suspension in der Lage ist, den angrenzenden Boden im Schlitz zu stützen und ob ein Herabfallen von Einzelkörnern oder Korngruppen aus der Wand in die Suspension verhindert wird. BZS haben im Gegensatz zu Bentonitsuspensionen ein erhöhtes Filterungsverhalten und bewirken an der Stützfläche auch einen stärkeren Filterkuchen, der letztendlich das Eindringen in gröbere Bodenschichten verhindern wird. Die Untersuchungen der Auslaufzeit t_M zeigten auf der anderen Seite, daß es bei unbewegten und bewegten BZS in Abhängigkeit von Bentonit- und Zementsorten und Konzentrationen dieser Stoffe zu einer Verflüssigung der BZS kommen kann.

Während der Aushubarbeiten soll die BZS möglichst rasch aus dem Greifer abfließen können (Geil, Meseck 1981). Die Laboruntersuchungen und Baustellenversuche hatten zum Ergebnis, daß das Fließverhalten mit dem Marsh-Trichter nur unzureichend beurteilt werden kann. Für die Beurteilung der BZS während der Aushubarbeiten kommt der Fließgrenze insofern große Bedeutung zu, da die Grenze der Meßgenauigkeit bei dem Marsh-Trichter bei 90 Sekunden zu suchen ist, die eigenen Untersuchungen aber ergeben haben, daß diese Grenze zeitweise überschritten wird und von daher ein weiteres Meßverfahren zur Beurteilung der Fließfähigkeit von BZS zu suchen ist.

Die Fließgrenze wird entsprechend DIN 4127 mit dem Pendelgerät ober der Kugelharfe (Soosometer) gemessen. Für die Baustellen- und Laboruntersuchungen stand ein von der Firma Bilfinger + Berger gefertigtes Meßgerät zur Verfügung, bei dem die Kugel in der Suspension ausgelenkt wird. Dies Gerät wurde für nahezu erschütterungsfreie Messungen auf Baustellen entwickelt. Nach den Messungen reichte der Meßbereich von $\tau_F = 42 \text{ N/m}^2$ oft nicht aus, um die maximalen Fließgrenzen zu erfassen (Bild 67).

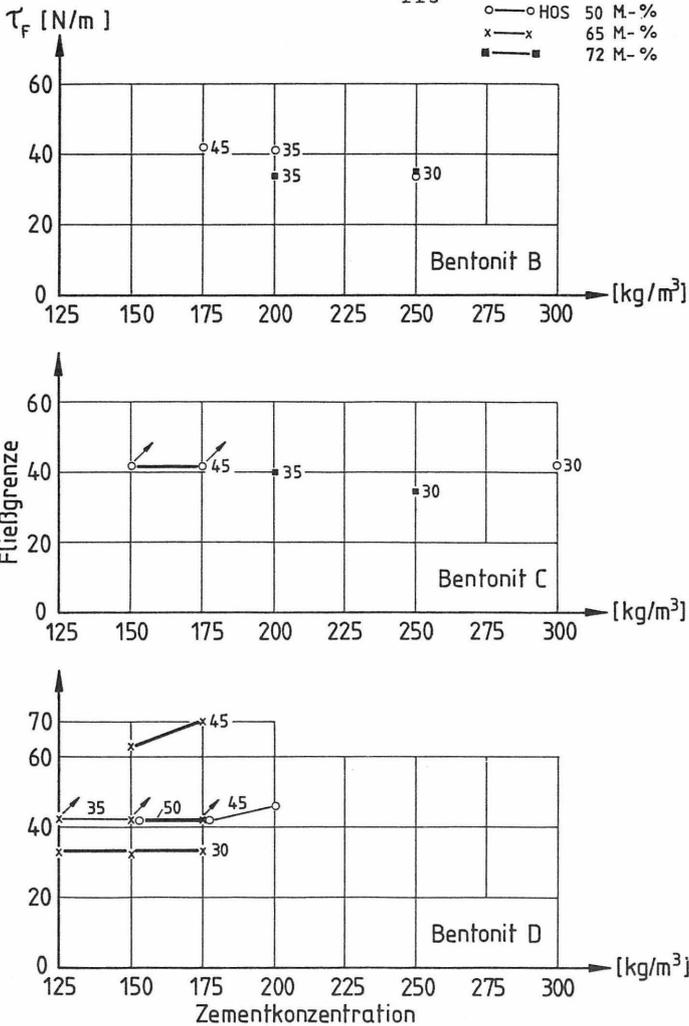


Bild 67: Fließgrenzwerte unbewegter BZS in Abhängigkeit von Bentonit, Zement und Bentonit- und Zementkonzentrationen

Das Soosometer gibt Fließgrenzwerte in Abhängigkeit von der Dichte der Suspension zwischen 5,7 N/m² und 70 N/m² an (Bild 68). D.h. die Fließgrenzwerte werden i.M. mit dem Soosometer besser erfaßt.

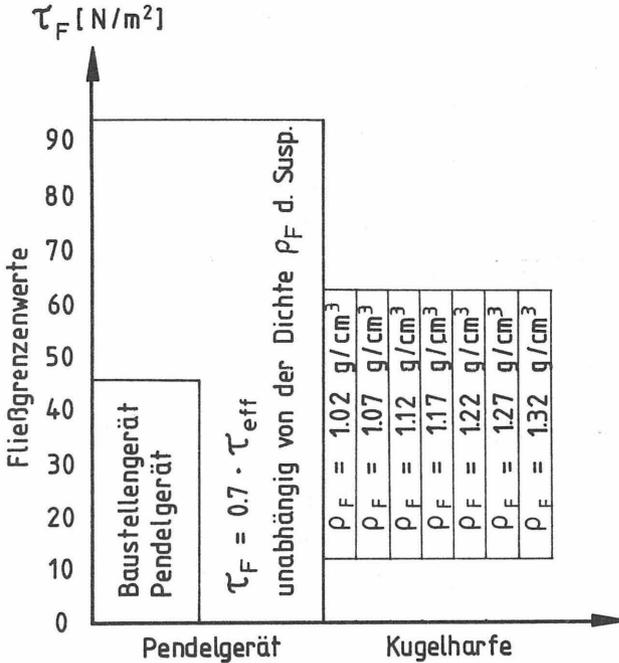


Bild 68: Bestimmung der Fließgrenzwerte mit den Meßgeräten: Pendelgerät und Kugelharfe

Die Baustellenmessungen ergaben ein Ansteifen der BZS zwischen Mischanlage und Zulaufrohr an der Dichtwand trotz Pumpbewegung der BZS. Bevor die BZS in den Schlitz gepumpt wurde, verblieb sie je nach Bedarf im Vorratsbehälter, wo sie nicht bewegt wurde. Der zeitabhängige Einfluß von Bentonitsorte, -konzentration, Zementsorte und -konzentration unbewegter und bewegter BZS ist in den Bildern 69 und 70 dargestellt. Abhängigkeiten sind aufgrund der nicht ausreichend zur Verfügung stehenden auswertbaren Meßdaten nicht klar erkennbar.

Nicht bewegte BZS versteifen im Vorratsbehälter nach dem Mischvorgang sehr rasch. Die Höhe der Fließgrenzenwerte wird durch die Bentonitkonzentration und -sorte und durch die Zementsorte bestimmt (Bild 69). Der Einfluß des HOS-Gehaltes auf die τ_F -Werte ist weniger ausgeprägt wie bei den t_M -Werten. Bei den HOS-Gehalten von 50 % ist hier jedoch die Verflüssigung der BZS mit der Zeit bei bewegten Suspensionen nicht erkennbar. Die Fließgrenzenwerte der bewegten BZS sind nahezu mit den Anfangswerten identisch, während nicht bewegte BZS sehr rasch ansteifen (Bild 69). Der Zuwachs der τ_F -Werte bei den Baustellenmessungen kann auf den ca. 0,5 Stunden dauernden Verbleib der BZS in dem Vorratsbehälter zurückzuführen sein (Bild 70).

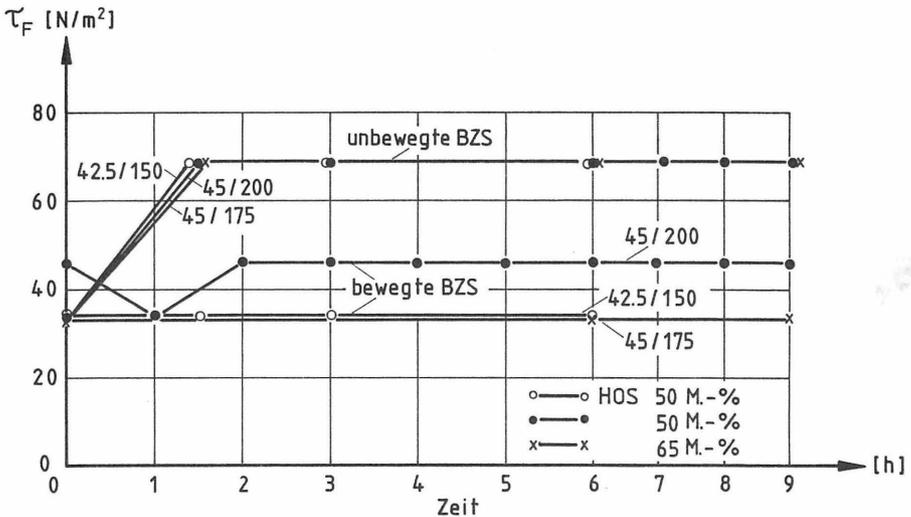


Bild 69: Einfluß von Bentonit- und Zementsorte und Konzentrationen auf Fließgrenzenwerte un- und bewegter BZS

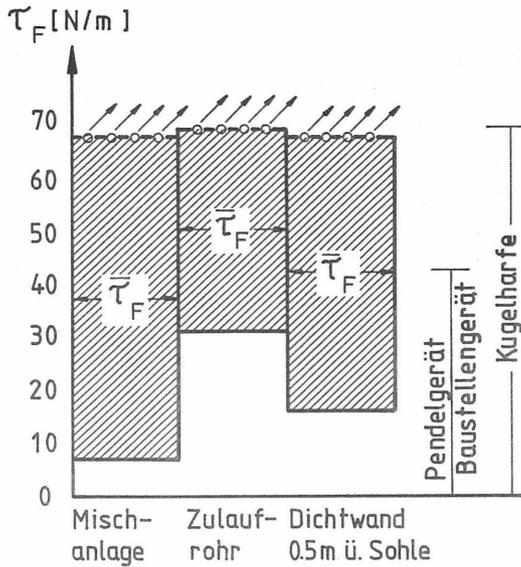


Bild 70: Veränderung der Fließgrenzenwerte (Baustellenmeßwerte)

7.4 Physikalische Eigenschaften von Ca-Bentonit-Zement-Suspensionen

Die Untersuchungen wurden mit 6 Ca-Bentoniten aus unterschiedlichen Lagerungsstätten durchgeführt. Sie wurden in Konzentrationen 150 bis 250 kg mit 1 m^3 Wasser gemischt und nach 4 Stunden Quellzeit der Zement in Konzentrationen von 150 bis 250 kg pro m^3 Ca-BZS zugegeben. Direkt nach der Herstellung und in 12 Stunden Rührversuchen wurden die physikalischen Eigenschaften

- Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter
- Filtratwasserabgabe
- Fließgrenze

bestimmt. Der zeitabhängige Quellvorgang der Ca-Bentonitsuspension ist nicht so ausgeprägt wie der in der Na-Bentonitsuspension. Durch die Erhöhung der hier gewählten Quellzeit von 4 Stunden soll der gegen Ionenaustausch wesentlich stabilere Ca-Bentonit möglichst viel Wasser binden.

7.4.1 Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter

Die Ca-BZS sind durch geringe Auslaufzeiten aus dem Marsh-Trichter gekennzeichnet, die mit der Bentonitkonzentration geringfügig ansteigen. Ein höherer Zementgehalt führt nur unwesentlich zu einer Versteifung, wobei ein Einfluß der Zementsorte nicht erkennbar ist. Nach 6 Stunden Rührzeit setzt die Hydratation des Zementes ein, es kommt zu einem stetigen Anstieg der Viskosität (Bilder 71 und 72).

7.4.2 Filtratwasserabgabe

Die Menge der Filtratwasserabgabe ist abhängig von der Bentonitsorte und -konzentration (Bild 73). Der HOS-Gehalt beeinflußt ebenso wie bei den Na-BZS die Filtratwasserabgabemengen. Da eine Reaktivierung des Bentonits entfällt, ist der Anstieg der Filtratwasserabgabe durch höhere Zementkonzentrationen geringer als bei Na-BBZ. Die Anfangswerte sind zwar aufgrund des geringeren Wasserbindevermögens (300 M.-%, Schultze, Muhs 1967) hier größer, die Filtratwasserabgabe steigt aber im Laufe des Rührversuchs geringer an (Bild 73 und 74).

Bei unbewegten BZS erhöht sich die Filtratwasserabgabe ebenfalls.

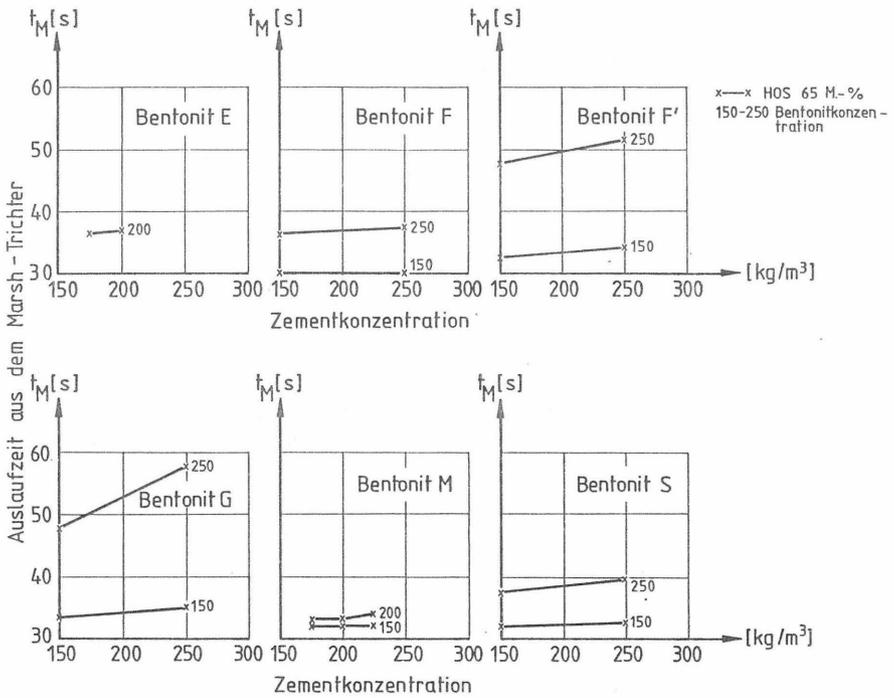


Bild 71: Auslaufzeiten unbewegter Ca-BZS in Abhängigkeit von Bentonitsorte, Zementsorte und Konzentrationen

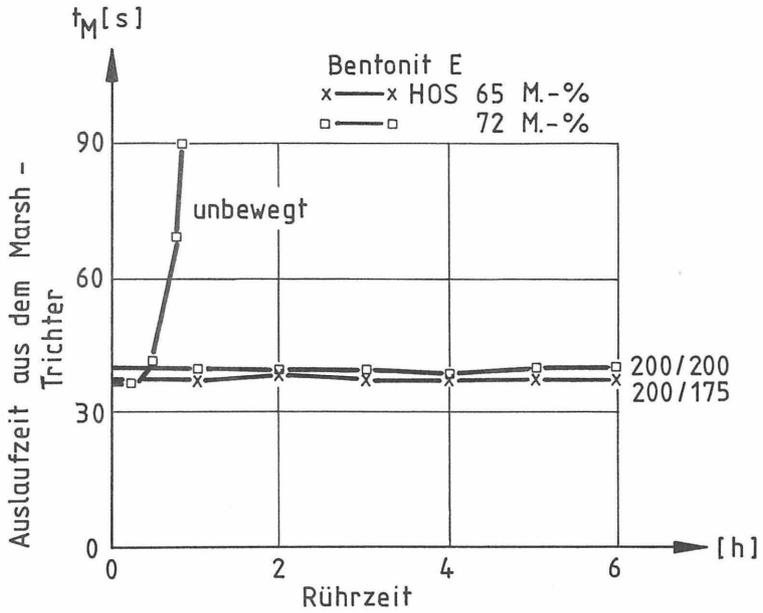


Bild 72: Auslaufzeiten bewegter Ca-BZS

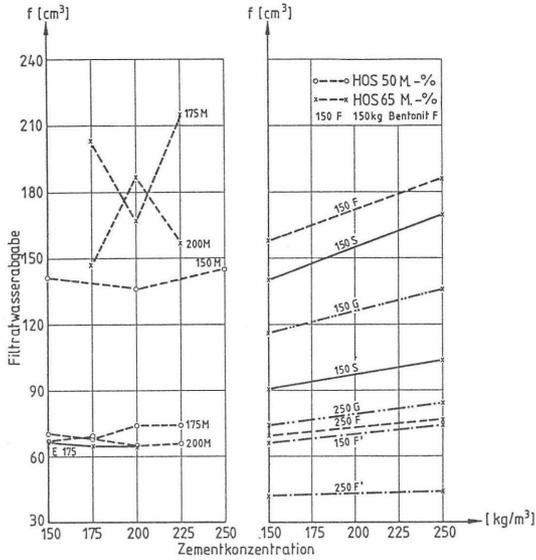


Bild 73: Filtratwasserabgaben unbewegter Ca-BZS in Abhängigkeit von Bentonit-, Zementsorte und Konzentration

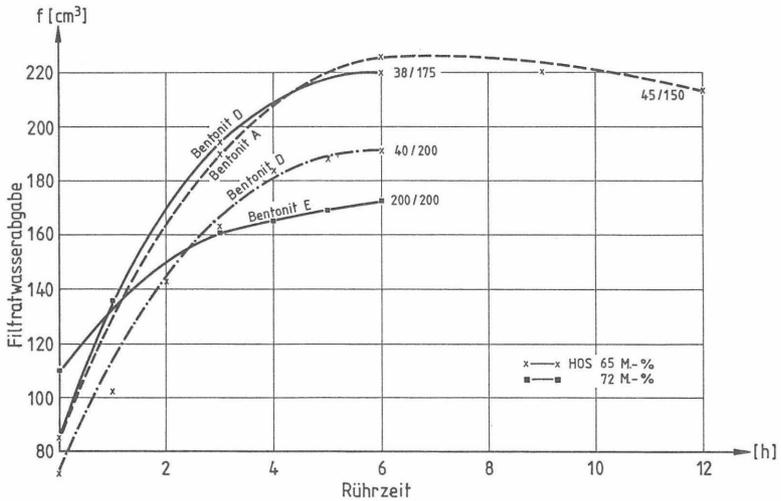


Bild 74: Filtratwasserabgaben bewegter Ca-BZS und Na-BZS

Der Anstieg der Filtratwasserabgabe ist auf den erhöhten Calciumgehalt in der BZS zurückzuführen. Die in der BZS gleichzeitig ablaufenden Reaktionsgleichungen lauten



Es stellt sich ein Überschuß an Ca^{2+} ein, der mit dem Bentonitrest $^-$ zur Bildung von Calciumbentonit führt. Um das Gleichgewicht nach dem Massenwirkungsgesetz wiederherzustellen, muß mehr Bentonitrest $^-$ gebildet werden, der aber kein Wasser bindet.

Bezogen auf den Inhalt der Filterpresse sind dies 210 und 177 kg. Die Kurvenverläufe ergeben, daß nach 6 Stunden maximal diese Wassermenge abgepreßt wurde. Die obere Grenze tolerierbarer Filtratwasserabgabemengen wurde mit 130 cm³ angenommen. Die nicht gebundenen Wassermengen in der BZS betragen zwischen 34 kg und 99 kg.

7.4.3 Fließgrenze

Zunehmender Bentonitgehalt in der Ca-BZS erhöht die gegenüber Na-BZS geringen τ_F -Werte. Ein deutlicher Zuwachs der Fließgrenzenwerte ist erst bei einer Aktivierung des Bentonits F mit 2 % Soda (Bentonit F') erkennbar (Bild 75).

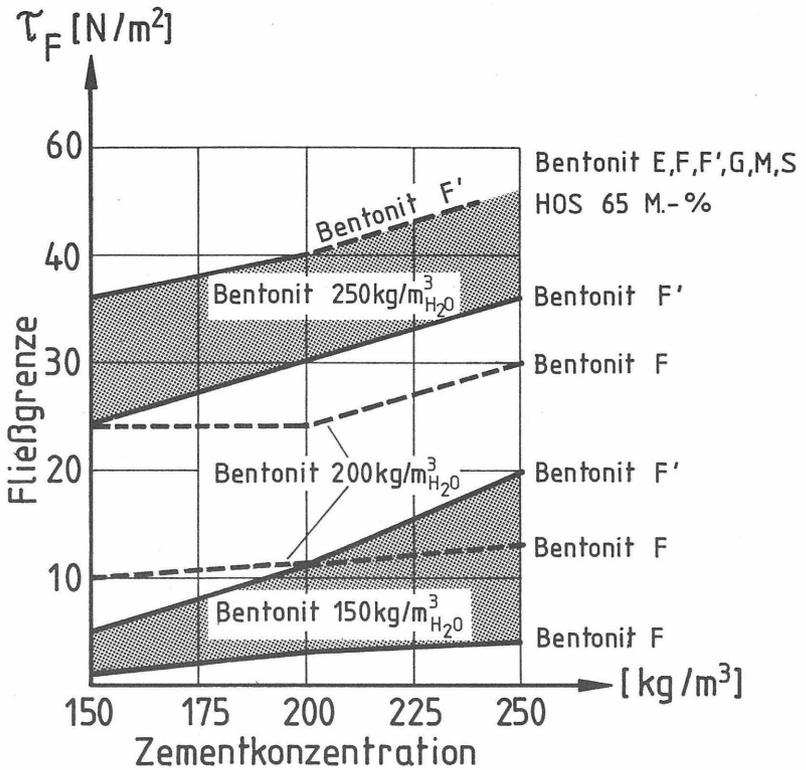


Bild 75: Fließgrenzwerte unbewegter Ca-BZS

7.5 Zusammenfassung

Für die untersuchten Na- und Ca-BZS wurden "Kennkurven" für die zeitliche Entwicklung von Viskosität (Auslaufzeit t_M) und Stabilität (Filtratwasserabgabe) aufgestellt. Mit diesen Kennkurven ist es möglich, je nach Anforderung eine Mischung mit niedriger, annähernd gleichbleibender oder rasch ansteigender Viskosität zu wählen. Die von Caron (1972) für Na-BZS geforderten 45 bis 55 Sekunden können lediglich als Richtwerte dienen, da die Auslaufzeiten sehr stark von

- Bentonitkonzentration
- Bentonitsorte (Ionenaustauschvermögen)
- Zementkonzentration
- Zementsorte (HOS-Anteil)

abhängen und Schwankungen unterliegen. Nach den vorliegenden Ergebnissen sollte für Eignungsprüfungen die Viskositätsänderung nach der Herstellung geprüft werden, da sie für den Baubetrieb (Pumpen, Verbleib in den Vorratsbehältern und Aushubzeiten) wichtig ist.

Ca-Bentonit unterliegt als natürlicher Rohstoff Schwankungen, die sich auch auf die Viskosität und Stabilität von BZS auswirken, wobei aber eine Kennzeichnung der Sorten ähnlich wie bei den Na-BZS nicht erkennbar ist. Die dargestellten Kurven können daher nur als Kennkurven für die jeweilige Bentonitsorte gelten.

Die Filtratwasserabgaben steigen mit der Zeit an, wobei der Anstieg bei den bewegten BZS größer ist. Die Filtratwasserabgaben erreichen ein Maximum, dessen Wert abhängig ist vom chemischen Gleichgewicht zwischen austauschbaren Na^+ -Ionen und den je nach HOS-Anteil zu Beginn an vorhandenen austauschfähigen Ca^{++} -Ionen aus dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Bei Na-BZS kann daher nicht beliebig viel Na-Bentonit in Ca-Bentonit verwandelt werden.

Für die Untersuchung der baubetrieblichen Eignung sollte daher auch die zeitabhängige Entwicklung der Filtratwasserabgabe geprüft werden. Wenn der Filterabpreßversuch mit dem tatsächlich am Dichtwandfuß vorhandenen Druck durchgeführt wird, kann in etwa der Suspensionsverlust abgeschätzt werden (s. Abschnitt 6).

Um verarbeitbare BZS mit hoher Stabilität zu erhalten, sollten in Abhängigkeit von der verwendeten Bentonitsorte die Auslaufzeiten für Na-BZS zwischen 45 und 60 s und die Filtratwassermengen unter 100 ml und bei Ca-BZS unter 150 ml nach der Herstellung liegen, wobei für Ca-BZS die Auslaufzeiten zwischen 30 und 35 s betragen.

BZS	Bentonitsorte Ionenaustausch- vermögen		-konzentration		Zementsorte HOS		-konzentration	
	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Na-BZS								
Meßwerte direkt nach dem Mischen	hoch	gering	gering	hoch	hoch	gering	hoch	gering
unbewegte Na-BZS Zeit nach Herstellung	an- steigend	ab- fallend	gering	hoch	ab- fallend	stei- gend	gering	ab- fallend
bewegte BZS	an- steigend	ab- fallend	gering	an- stei- gend	ab- fallend	stei- gend	abfal- lend	stei- gend
Ca-BZS	nicht reprodu- zierbar		gering	leicht stei- gend	nicht erkennbar		gering	leicht anstei- gend

Bild 76: Einfluß der Materialien in BZS auf die Entwicklung der Auslaufzeit

8 Untersuchung der Kennwerte vor und nach Hydratation

8.1 Kennwerte vor Beginn der Hydratation

Der Zement wird einer gequollenen Bentonitsuspension zugemischt, daher führt das hohe Wasserbindevermögen des Bentonits zu einem reduzierten W_R/Z -Faktor. Unter Berücksichtigung der sich ausbildenden Gelstrukturen ergeben sich die bodenmechanischen Kenngrößen der BZS wie folgt:

Dichte der BZS nach der Herstellung

$$\rho_F = \frac{m_S}{V_S} \quad (\text{Gl.52})$$

m_S = Masse Suspension [g]
 V_S = Volumen Suspension [cm³]
 m_W = Masse Wasser [g]
 m_d = Trockenmasse [g]

Wassergehalt

$$w = \frac{m_W}{m_d} \quad (\text{Gl.53})$$

Das Suspensionsvolumen V_S ergibt sich aus:

$$V_S = \frac{m_B}{\rho_B} + \frac{m_W}{\rho_W} + \frac{m_Z}{\rho_Z} \quad [\text{cm}^3] \quad (\text{Gl.54})$$

Korndichten Bentonit $\rho_B = 2,650 \text{ g/cm}^3$
 Zement $\rho_Z = 3,000 \text{ g/cm}^3$
 Wasser $\rho_W = 1,000 \text{ g/cm}^3$

Bestimmung der Korndichte:

$$\rho_s = \frac{\text{Trockenmasse } m_d}{\text{Volumen der Festmasse } V_F} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (\text{Gl. 55})$$

Für die Suspensionen direkt nach der Herstellung ergeben sich die zu errechnenden Korndichten dann aus folgender Definition:

$$\rho_s = \frac{m_{dB} + m_{dZ}}{V_{FB} + V_{FZ}} \quad (\text{Gl. 56})$$

8.2 Kennwerte nach der Hydratation

8.2.1 Bestimmung der Korndichte

Der Zement benötigt zur vollständigen Hydratation ca. 35 % - 40 % seines Gewichtes an Wasser. Dieses Wasser wird zu etwa 25 % chemisch fest an den Zement gebunden und liegt als Festsubstanz vor. Zusätzlich werden aber noch 5 % - 15 % als sog. Gelwasser physikalisch gebunden. Dieses Gelwasser wird als "pseudofest" betrachtet und ebenfalls dem Feststoff zugerechnet. Die in der Literatur genannten Prozentangaben schwanken in den oben angegebenen Bereichen. Sicher ist, daß bei einem W/Z-Wert von 0,4 der Zement vollständig hydratisiert.

Für die weitere Berechnung werden folgende Werte zugrunde gelegt:

vollständige Hydratation bei W/Z = 0,4
d.h. an den Zement gebunden sind 40 M.-% Wasser
wobei
25 M.-% chemisch gebundenes Wasser (Kristallwasser)
und
15 M.-% physikalisch gebundenes Wasser (Gelwasser)
ist.

Mischung	Zusammensetzung	Masse		Volumen			Dichte ρ_F
		fest	flüssig	fest	flüssig		
45/150		[g]	[g]	[cm ³]	Kapillarporen gebunden [cm ³]	Schrumpfporen [cm ³]	[g/cm ³]
vor der Hydratation	Bentonit	42,0		15,9			
	Zement	150,0		50,0			
	Wasser		934,1		934,1		
		$\Sigma 192,0$	$\Sigma 934,1$	$\Sigma 65,9$	$\Sigma 934,1$		1,126
nach der Hydratation	Bentonit	42,0		15,9			
	Gelwasser 700 M.-%		294,0		294,0		
	Zement	150,0		50,0			
	Kristallwasser 25 M.-%	37,5		28,1			
	Schrumpfporen mit Wasser aufgefüllt		9,4			9,4	
	Gelwasser 15 M.-%		22,5		22,5		
	Wasser		580,1		580,1		
		$\Sigma 229,5$	$\Sigma 906,0$	$\Sigma 94,0$	$\Sigma 316,5$	$\Sigma 580,1$	$\Sigma 9,4$
		$\Sigma 1135,5$			$\Sigma 1000,0$		1,136

Mischung	Zusammensetzung	Masse		Volumen			Dichte ρ_F
		fest	flüssig	fest	flüssig		
45/175		[g]	[g]	[cm ³]	Kapillarporen gebunden [cm ³]	Schrumpfporen [cm ³]	[g/cm ³]
vor der Hydratation	Bentonit	41,7		15,8			
	Zement	175,0		58,3			
	Wasser		925,9		925,9		
		$\Sigma 216,7$	$\Sigma 925,9$	$\Sigma 74,1$	$\Sigma 925,9$		1,143
nach vollständiger Hydratation	Bentonit	41,7		15,8			
	Gelwasser 700 M.-%		291,9		291,9		
	Zement	175,0		58,3			
	Kristallwasser 25 M.-%	43,8		32,8			
	Schrumpfporen mit Wasser aufgefüllt		10,9			10,9	
	Gelwasser 15 M.-%		26,3		26,3		
	Wasser		563,9		563,9		
		$\Sigma 260,5$	$\Sigma 893,0$	$\Sigma 106,9$	$\Sigma 318,2$	$\Sigma 563,9$	$\Sigma 10,9$
		$\Sigma 1153,5$			$\Sigma 1000,0$		1,154

Bild 77: Kenngrößen der Mischungen 45/150 und 45/175 vor und nach der Hydratation

Mischung	Zusammensetzung	Masse		Volumen			Dichte ρ_F
		fest	flüssig	fest	flüssig		
200/150		[g]	[g]	[cm ³]	Kapillarporen gebunden [cm ³]	Schrumpfporen [cm ³]	[g/cm ³]
vor der Hydratation	Bentonit	176,7		66,7			
	Zement	150,0		50,0			
	Wasser		883,3		883,3		
		$\Sigma 326,7$	$\Sigma 883,3$	$\Sigma 116,7$	$\Sigma 883,3$		1,208
nach der Hydratation	Bentonit	175,0		66,7			
	Gelwasser 300 M. %		525,0		525,0		
	Zement	150,0		50,0			
	Kristallwasser 25 M. %	37,5		28,1			
	Schrumpfporen mit Wasser aufgefüllt		9,4			9,4	
Gelwasser 15 M. %		22,5			22,5		
Wasser		298,3			298,3		
		$\Sigma 362,5$	$\Sigma 855,2$	$\Sigma 144,8$	$\Sigma 547,5$	$\Sigma 298,3$	$\Sigma 9,4$
		$\Sigma 1217,7$			$\Sigma 1000,0$		1,218

Mischung	Zusammensetzung	Masse		Volumen			Dichte ρ_F
		fest	flüssig	fest	flüssig		
200/175		[g]	[g]	[cm ³]	Kapillarporen gebunden [cm ³]	Schrumpfporen [cm ³]	[g/cm ³]
vor der Hydratation	Bentonit	175,0		66,0			
	Zement	175,0		58,3			
	Wasser		875,6		875,6		
		$\Sigma 350,0$	$\Sigma 875,6$	$\Sigma 124,3$	$\Sigma 875,6$		1,226
nach vollständiger Hydratation	Bentonit	175,0		66,0			
	Gelwasser 300 M. %		525,0		525,0		
	Zement	175,0		58,3			
	Kristallwasser 25 M. %	43,8		32,8			
	Schrumpfporen mit Wasser aufgefüllt		10,9			10,9	
Gelwasser 15 M. %		26,3			26,3		
Wasser		280,5			280,5		
		$\Sigma 393,8$	$\Sigma 842,7$	$\Sigma 157,1$	$\Sigma 551,3$	$\Sigma 280,5$	$\Sigma 10,9$
		$\Sigma 1236,5$			$\Sigma 1000,0$		1,237

Bildl 78: Kenngrößen der Mischungen 200/150 und 200/175 vor und nach der Hydratation

Das chemisch gebundene Wasser verliert beim Einbau in das Kristallgitter 1/4 seines Ausgangsvolumens, so daß das Volumen statt 25 cm³ nur noch 18,75 cm³ bezogen auf 100 g Zement beträgt.

V_{md} = Volumen aus Bentonit und Zement vor der Hydratation [cm³]

Volumen der Festsubstanz

$$V_F = V_{md} + 0,1875 \cdot 3 \cdot V_Z + 0,15 \cdot 3 \cdot V_Z \quad (Gl.57)$$

$$V_F = V_{md} + 1,0125 V_Z \quad (Gl.58)$$

Masse der Festsubstanz

$$m_F = m_Z + m_B + 0,25 m_Z + 0,15 m_Z \quad (Gl.59)$$

$$m_F = m_Z + m_B + 0,4 m_Z \quad (Gl.60)$$

Daraus ermittelt sich die Korndichte ρ_s zu:

$$\rho_s = \frac{m_F}{V_F} \quad [g/cm^3] \quad (Gl.61)$$

Am Beispiel von zwei Na-BZS wird die Korndichte ρ_s nach der Hydratation ermittelt:

Mischung 45/150:

$$V_F = 65,9 + 0,1875 \cdot 150 + 0,15 \cdot 150 = 116,5 \text{ cm}^3 \quad (Gl.62)$$

$$m_F = 150 + 42 + 0,25 \cdot 150 + 0,15 \cdot 150 = 252,0 \text{ g} \quad (Gl.63)$$

$$\rho_s = \frac{252,0}{116,5} = 2,163 \text{ g/cm}^3 \quad (Gl.64)$$

Mischung 45/175:

$$V_F = 74,1 + 0,1875 \cdot 175 + 0,15 \cdot 175 = 133,2 \text{ cm}^3 \quad (\text{Gl.65})$$

$$m_F = 175 + 42 + 0,25 \cdot 175 + 0,15 \cdot 175 = 287,0 \text{ g} \quad (\text{Gl.66})$$

$$\rho_S = \frac{287,0}{133,2} = 2,155 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Gl.67})$$

8.2.2 Berechnung des Wassergehaltes

Da die Probekörper unter Wasser lagerten, sind im Volumen nur wassergefüllte Poren enthalten. Die durch die Schrumpfung entstandenen Poren wurden mit Wasser gefüllt. Die erhärtete BZS besteht somit nur aus Wasser und Feststoff. Damit folgt für das Volumen des freien Wassers oder Kapillarwassers V_K :

$$V_S = V_K + V_F \quad \text{oder} \quad V_K = V_S - V_F \quad (\text{Gl.68})$$

Bei der Ofentrocknung $T = 105^\circ\text{C}$ wird jedoch auch das physikalisch gebundene Gelwasser verdampft, so daß das bei der Ofentrocknung festgestellte Wasser aus dem Kapillarwasser V_K und dem Gelwasser V_G besteht. Daraus folgt gleichzeitig, daß die Masse der Festsubstanz m_F um den Massenanteil des pseudofesten Gelwassers verringert wird.

$$V_W = V_K + V_G = V_S - V_F + 0,15 \cdot 3 \cdot V_Z \quad (\text{Gl.69})$$

$$m_d = m_F - 0,15 m_Z = m_Z + m_B + 0,25 m_Z \quad (\text{Gl.70})$$

w_E = Wassergehalt nach Ofentrocknung

$$w_E = \frac{V_S - V_F + 0,15 \cdot 3 \cdot V_Z}{m_Z + m_B + 0,25 m_Z} \quad (\text{Gl.71})$$

8.2.3 Berechnung der Dichte

Das chemisch am Zement gebundene Wasser verliert 1/4 seines Volumens, auf 100 g Zement sind das $25 \text{ cm}^3 - 18,75 \text{ cm}^3 = 6,25 \text{ cm}^3$ Wasser.

Bei der Erhärtung wird zusätzlich zum Anmachwasser aus dem umgebenen Wasser auf 100 g Zement $6,25 \text{ cm}^3$ Wasser eingelagert. Aus diesem Grunde ist die Feuchtmasse nach Beendigung der Hydratation größer als nach der Herstellung, nämlich $6,25 \text{ g}$ pro 100 g Zement, während das Gesamtvolumen V_S konstant bleibt, da die Schrumpfporen mit Wasser aufgefüllt werden.

Dichte nach beendeter Hydratation

$$\rho_E = \frac{m_S + 0,0625 \cdot m_Z}{V_S} \text{ [g/cm}^3 \text{]} \quad (\text{Gl.72})$$

8.2.4 Berechnung der Trockendichte, des Porenanteils und der Sättigungszahl

Die Berechnung dieser Kenngrößen erfolgt nach den allgemein bekannten Beziehungen unter Berücksichtigung der oben ermittelten Werte.

$$\text{Trockendichte} \quad \rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad \text{[g/cm}^3 \text{]} \quad (\text{Gl.73})$$

$$\text{Porenanteil} \quad n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_S} \quad \text{[-]} \quad (\text{Gl.74})$$

$$\text{Porenzahl} \quad e = \frac{n}{1 - n} \quad \text{[-]} \quad (\text{Gl.75})$$

$$\text{Sättigungszahl} \quad s = \frac{w \cdot \rho_S}{e \cdot \rho_W} \quad \text{[-]} \quad (\text{Gl.76})$$

Für die untersuchten Mischungen ergaben sich folgende Werte:

Mischung	45/150	45/175
ρ_d	0,230	0,260
n	0,894	0,879
e	8,434	7,264
S_r	1,010	1,018

Bild 79: Berechnung von Trockendichte, Porenanteil, Porenzahl und Sättigungszahl nach bodenmechanischer Definition

Die Sättigungszahlen sind größer als 1, die theoretisch nicht vorkommen können, da das Volumen der flüssigen Phase, in diesem Falle das Volumen des Wassers, niemals größer als das Volumen der Poren ist.

In der Bodenmechanik ist die Korndichte definiert (Gl.61) als

$$\rho_s = \frac{\text{Trockenmasse } m_d}{\text{Volumen der Festmasse } V_F}$$

mit m_d = Masse des Bodens nach Trocknung bei 105°C.

Nun wird beim Zement bei 105° das Gelwasser, welches eigentlich der Festmasse zugeschrieben wird, vollständig verdampft. Dieses Gelwasser darf also bei Berechnung der Korndichte laut Definition nicht berücksichtigt werden.

Die zuvor berechnete Korndichte von 2,16 g/cm³ ist dadurch viel zu klein, aber aus zementtechnischer Sicht durchaus nicht falsch (das Gelwasser wird ja als Teil der Festmasse angesehen). Aus der in der Bodenmechanik definierten Korndichte ergeben sich jedoch andere Werte, die im nachfolgenden ohne Berücksichtigung des Gelwassers ermittelt werden.

$$\text{Volumen der Festmasse} \quad V_F = V_{\text{md}} + 0,1875 \cdot 3 \cdot V_Z \quad (\text{Gl.77})$$

$$\text{Masse der Festsubstanz} \quad m_F = m_Z + m_B + 0,25 \cdot m_Z \quad (\text{Gl.78})$$

Mischung 45/150:

$$V_F = 65,9 + 0,1875 \cdot 150 = 94,03 \text{ cm}^3 \quad (\text{Gl.79})$$

$$m_F = 150 + 42 + 0,25 \cdot 150 = 229,5 \text{ cm}^3 \quad (\text{Gl.80})$$

$$\rho_S = \frac{229,5}{94,03} = 2,441 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Gl.81})$$

Mischung 45/175:

$$V_F = 74,1 + 0,1875 \cdot 175 = 106,91 \text{ cm}^3 \quad (\text{Gl.82})$$

$$m_F = 175 + 41,7 + 0,25 \cdot 175 = 260,45 \text{ g} \quad (\text{Gl.83})$$

$$\rho_S = \frac{260,45}{106,91} = 2,436 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Gl.84})$$

Mit der so errechneten Korndichte ergeben sich die anderen Kenngrößen wie folgt:

Mischung	45/150	45/175
ρ_d	0,230	0,260
n^*	0,906	0,893
e^*	9,613	8,356
S_r	1,000	1,000

Bild 80: Trockendichte, Porenanteil, Porenzahl und Sättigungszahl ausgehärteter DWM

Wassergehalt, Dichte und Trockendichte werden durch die Korndichte nicht verändert. Wohl aber der Porenanteil n^* , der nun größer geworden ist und die Sättigungszahl S_r^* die, da von der vollständigen Füllung der Poren mit Wasser ausgegangen wird, genau 1,0 ist.

Das physikalisch am Bentonit und Zement gebundene Wasser verringert den Porenanteil n . Für die weiteren Untersuchungen, speziell des durchlässigen Porenraumes, wird der Porenanteil n verwendet.

Kenngrößen von Bentonit-Zement-Suspensionen im ausgehärteten Zustand

$$\rho_E = \frac{m_S + 0,625 \cdot m_Z}{V_S}$$

Trockendichte

$$\rho_d = \frac{\rho_E}{1 + w}$$

Porenanteil

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_S}$$

Porenzahl

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

Sättigungszahl

$$S = \frac{w \cdot \rho_S^*}{e}$$

Korndichte

$$\rho_S^* = \frac{m_B + m_Z + 0,25 \cdot m_Z}{V_F + \frac{0,1875 \cdot m_Z}{\rho_Z}}$$

Bild 81: Kenngrößen bei vollständiger Hydratation und Wasserlagerung

8.3 Veränderung der Korndichte während der Hydratation

Die Korndichte ist nur konstant, wenn die Erhärtung abgeschlossen ist. Während der Hydratation verändert sich die Korndichte in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad. Diese Veränderung der Korndichte beträgt etwa 20 % bezogen auf den Endwert.

Der Hydratationsgrad ist definiert als der Gehalt an chemisch gebundenem Wasser, bezogen auf den höchstmöglichen Wert von 25 % des Zementgewichtes (Krenkler, 1980).

In Bild 82 sind die Ergebnisse dieser Berechnung - Korndichte in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad - für die untersuchten Na-BZS 45/150 und 45/175 und Ca-BZS 200/150 und 200/175 dargestellt.

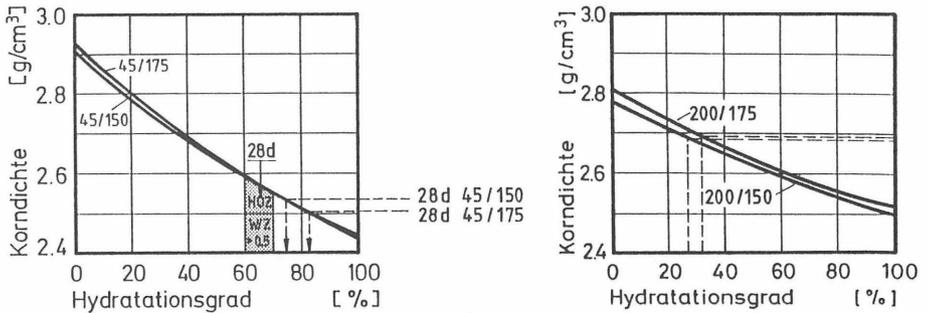


Bild 82: Korndichte von Bentonit-Zement-Suspensionen als Funktion des Hydratationsgrades

8.4 Folgerungen

Die Beständigkeit der Dichtwandmassen soll zu einem frühen Zeitpunkt durch Durchströmung (s. Bild 48) mit Prüf Flüssigkeiten untersucht werden. Daher ist es notwendig, den Aushärtungsgrad der Dichtwandmassen bzw. den Erhärtungsverlauf zu kennen.

Mit den Kenngrößen Dichte, Wassergehalt und Korndichte soll nun der Hydratationsgrad und Erhärtungsverlauf von Dichtwandmassen in den nachfolgenden Kapiteln in Verbindung mit gemessenen Festigkeiten und Durchlässigkeiten verglichen und beschrieben werden.

9 Untersuchung der Erhärtung und Wasserdurchlässigkeit

Die Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der frischen BZS zeigte, daß je nach Bentonitsorte, Zementsorte und Konzentrationen sehr unterschiedliche Viskositäten auftreten. Bei der Zementerhärtung wird der wassergefüllte Porenraum mit Zementhydratphasen aufgefüllt und dadurch verringert, was zu einer Abnahme der Durchlässigkeit führt. Durch die beschriebenen Einflüsse der HOS auf Bentonit und die durch Ca(OH)_2 bedingte Reaktivierung des Na-Bentonits wird die am Bentonit gebundene Wassermenge verringert, was die Durchlässigkeit wiederum erhöht. Mit den folgenden Untersuchungen soll geklärt werden, ob die Wechselwirkung von Bentonit und Zement sich auch auf die Eigenschaften der erhärteten Dichtwandmassen auswirkt.

9.1 Erstarrungsverhalten

Caron (1973) weist darauf hin, daß Viskositätsabweichungen von einer Marshsekunde zu Festigkeitsabweichungen von mehr als 10 % führen können. Demzufolge muß nach den vorliegenden Untersuchungen an bewegten und unbewegten BZS in Abhängigkeit vom HOS-Anteil ein gravierender Unterschied im Erhärtungsverlauf von DWM bestehen. Entsprechend dem Erhärtungsverlauf der DWM nimmt die Dichtigkeit von DWM zu. Für die Abdichtung gegen aggressive Wässer ist es wichtig, den Erhärtungsverlauf der zu untersuchenden DWM zu kennen, um abzuschätzen, inwieweit die DWM gegebenenfalls durch Austrag von festigkeitsbildenden Stoffen geschädigt wird.

Nach Herstellung und Prüfung der BZS wurden zur Untersuchung dieser Zusammenhänge Proben unter Wasser bei 18 bis 20°C Temperatur gelagert und mit dem Vicát-Nadelgerät auf ihr Erstarrungsverhalten geprüft. Dabei wurde das Nadelgerät mit Tauchstab und ohne Zusatzgewicht benutzt, da der Spitzendruck der Nadel von 2935 kN/m² die Anfangsfestigkeiten der BZS weit übersteigt und die Nadel damit für die Messung der Erstarrung der BZS unbrauchbar ist.

Der vom Tauchstab aufgebrachte Spitzendruck von $37,5 \text{ kN/m}^2$ liegt zwar immer noch sehr hoch, die Messungen liefern aber im Vergleich zu Frühfestigkeiten von BZS brauchbare Ergebnisse.

Die im Abstand von 2 bis 4 Stunden zu Beginn der Messungen und nach Erstarrungsbeginn im Abstand von 1 bis 2 Stunden ermittelte Eindringungen des Tauchstabes nach DIN 1164 ergab die in Bild 83 dargestellten Erstarrungsverläufe für Na-BZS und Ca-BZS. Als Erstarrungsbeginn (Eindringtiefe des Tauchstabes 40 mm) wurde der Zeitpunkt der Festigkeitsentwicklung definiert, wo der Tauchstab die 40 mm hohe BZS Probe im Vicat-Nadelgerätes nicht mehr vollständig durchdringt. Da dieser Punkt sich nicht exakt feststellen läßt, wurde der Erstarrungsbeginn aus den vorhandenen Ablesungen extrapoliert. Das Erstarrungsende ist durch die Eindringtiefe $\leq 1 \text{ mm}$ des Tauchstabes definiert.

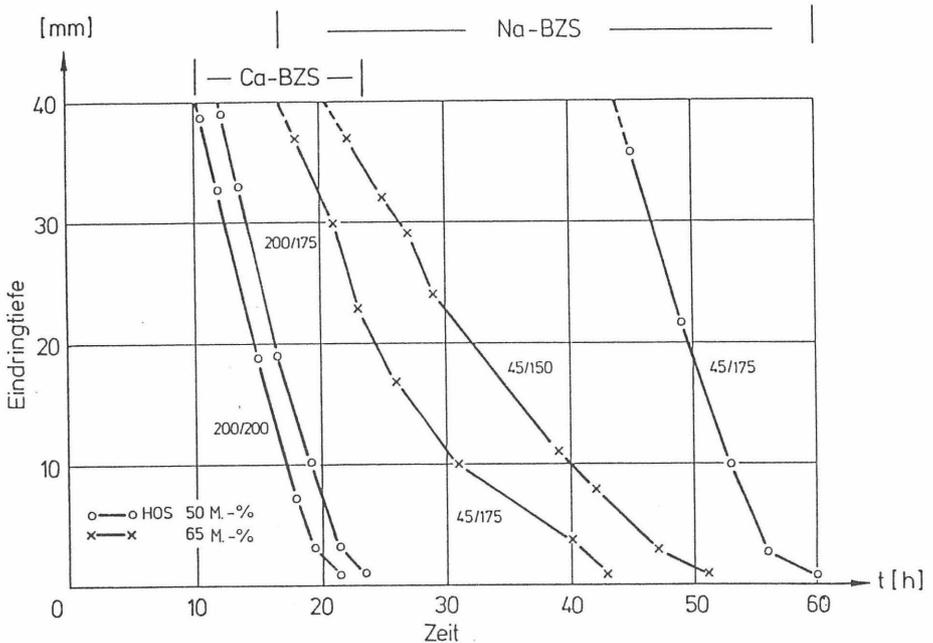


Bild 83: Erstarrungsmessungen mit Vicat-Nadelgerät

Die Gegenüberstellung von Erstarrungsmessungen an Na-BZS mit den (Bentonitsorten B, C und D) ergab, daß für das Erstarrungsende die Bentonitsorte keinen Einfluß hat und die Zementsorte mit dem höheren HOS-Anteil früher erstarrt. Dies stimmt mit den Erkenntnissen aus den Viskositätsuntersuchungen an unbewegten BZS überein, da hier bei der Hydratation weniger Calciumhydroxid abgespaltet und somit auch weniger Calciumbentonit in der BZS gebildet wird. Nicht berücksichtigt sind hier die Einflüsse von unterschiedlichen Mahlfeinheiten der Zemente. Eine recht gute Übereinstimmung ergibt die Auftragung der Erstarrungszeiten t_e (Erstarrungsende) in Abhängigkeit vom Wassergehalt der untersuchten Ca-BZS und Na-BZS (Bild 84). Die beiden dargestellten Kurven beziehen sich auf Meßwerte für zwei Grundmischungen 40/200 (36,2 kg Bentonit B und C, 200 kg HOZ 35L (50 M.-% HOS) und 921,6 kg Wasser und 40/175 (37,2 kg Bentonit B, 175 kg HOZ 35 L (50 M.-% HOS) und 929,5 kg Wasser), wobei der Wasserfeststoffwert W (Z+B) von 4,38 und 3,89 auf 3,2 und 1 reduziert wurde. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, damit das Mengenverhältnis Bentonit/Zement konstant blieb und lediglich der Wassergehalt der Mischungen reduziert wurde.

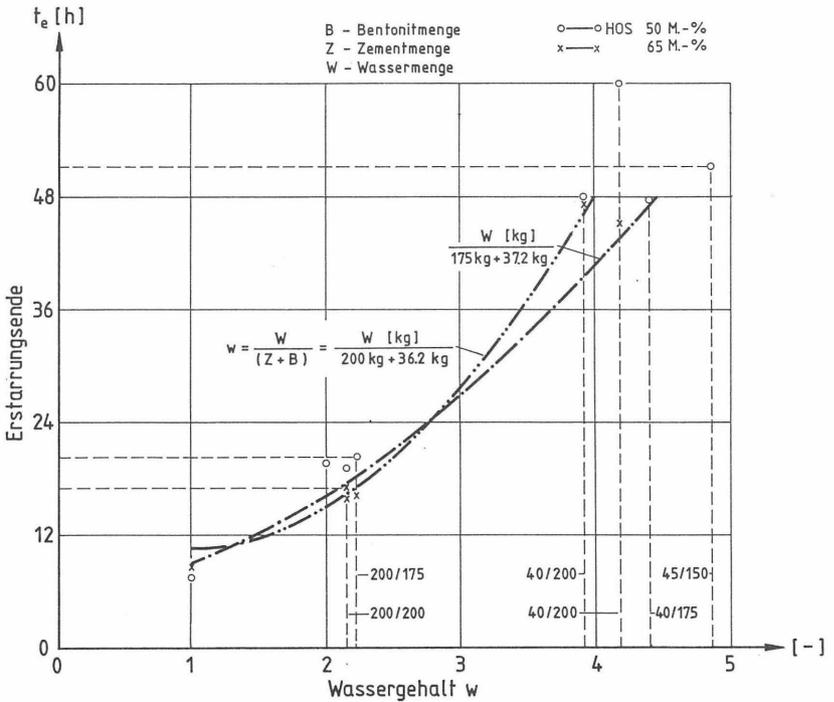


Bild 84: Abhängigkeit der Erstarrungszeit t_e (Tauchstabeindringung < 1 mm) vom Wassergehalt der Frischsuspension

Das unterschiedliche Erstarrungsverhalten von Na-BZS und Ca-BZS wurde durch die Ermittlung der undrainierten Scherfestigkeiten C_u [kN/m²] mit der Drehflügelsonde bestätigt (Bild 85). Meßwerte wurden bei Ca-BZS mit Bentonit E bereits nach 6 Stunden und bei den Ca-BZS mit Bentonit M und Na-BZS erst nach 24 Stunden erfaßt. Die Scherfestigkeitswerte lassen erkennen, daß die bewegten Ca-BZS wesentlich später erstarren als die unbewegten Ca-BZS. Die geringeren Anfangsfestigkeiten bewegter BZS im Vergleich zu unbewegten BZS sind auf die gleichen Zusammenhänge, wie bei den Viskositätsmessungen beschrieben, zurückzuführen (Bild 86).

Mischung	Bentonitsorte	Zementsorte HOS [. M.-%]	unbewegte BZS		bewegte BZS		
			Auslaufzeit t_M [s]	Scherfestigkeit c_u [KN/m ²]	Auslaufzeit t_M [s]	Scherfestigkeit c_u [KN/m ²]	
Zeit nach Herstellung				6h	24h	6h	24h
45/150	B	50	40	0			
		65	62,5	0	10,3		
		70					
		72	80,5	0	5,5		
	C	50					
		65	61	0	1,4	0	0
		70	55	0	0		
		72	54	0	0,325	0	0
	D	50					
		65	64	0	8,35		
		70	58,5	0	10,25	65	0
		72					
45/175	B	50					
		65	60,5	0	13,5		
		70					
		72	71,5	0	12,0		
	C	50					
		65	55,5	0	0		
		70	60,5	0	0	58	0
		72	46	0	0,35		5,3
	D	50		0	1,0		0
		65	53,5	0	9,8	59	0
		70					
		72	56,5	0	14,25		5,5
200/175	M	50	33	0	0		
		65					
		70					
	E	72	35	0	12,5		
		50					
		65	36,5	4,1	16,25		
200/200	M	70					
		72	35	0	12,0		
		50					
	E	65	37	5	19,0		
		70					
		72	36,5	4,9	16,35	4,0	0

Bild 85: Undrainierte Scherfestigkeiten c_u [kN/m²] und Auslaufzeiten t_M [s] un- und bewegter BZS

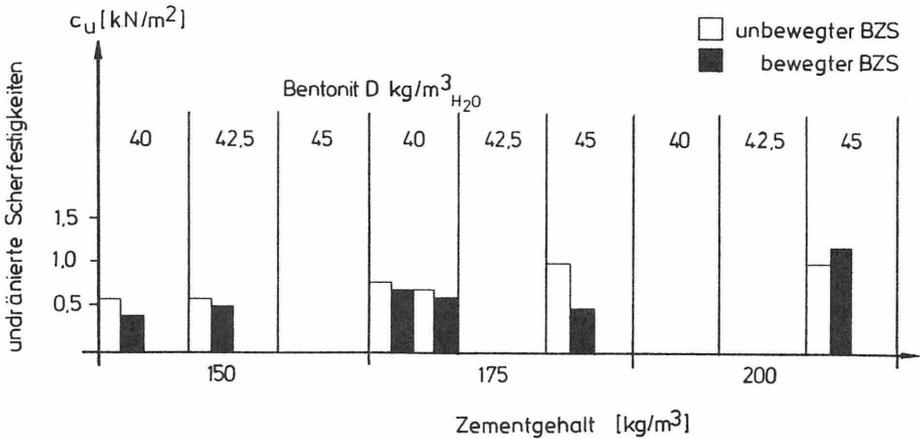


Bild 86: Undrainierte Scherfestigkeiten un- und bewegter BZS (Rührdauer 9 Stunden) von BZS in Abhängigkeit vom Bentonit- und Zementgehalt

Die Scherfestigkeit steigt mit zunehmendem HOS-Anteil im Zement an.

Bei den Viskositätsuntersuchungen war festzustellen, daß sich mit niedrigem HOS-Anteil im Zement eine Verflüssigung der BZS mit zunehmender Rührdauer einstellte. Dementsprechend liegen bei den bewegten Suspensionen mit höherem HOS-Anteil auch größere Anfangsfestigkeiten und somit ein beschleunigter Erhärtungsverlauf vor. Ein Abfall der Festigkeit bei geringerer Auslaufzeit wurde festgestellt, nicht aber der gravierende Unterschied von 10 % Verringerung der Festigkeit bei Verminderung von 1 Marshsekunde.

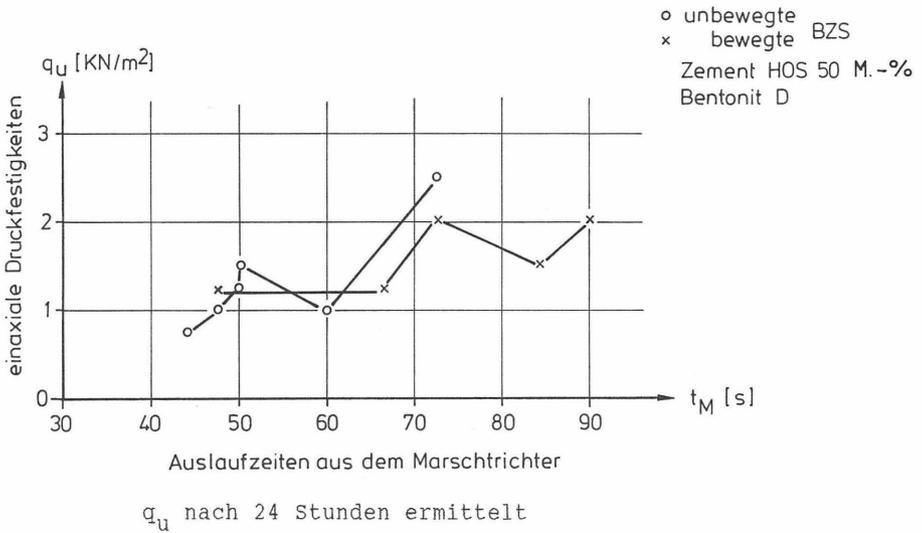


Bild 87: einaxiale Druckfestigkeit q_u (kN/m²) in Abhängigkeit von den Auslaufzeiten unbewegter und bewegter BZS

Nach Erstarrungsende t_e ist der Festigkeitsverlauf der unbewegten und der bewegten BZS nahezu identisch.

9.2 Erhärtung

9.2.1 Na-BZS

Die Erhärtung der BZS ist wiederum abhängig von der Bentonitsorte und Zementsorte. Die Bentonitsorten B und C bewirken höhere Anfangsfestigkeiten, während bei der Bentonitsorte D eine verzögerte Festigkeitsentwicklung festzustellen ist, die insgesamt aber zu hohen Festigkeiten führt. Die Festigkeiten steigen mit zunehmendem HOS-Anteil in Zement rasch an (Geil, 1982).

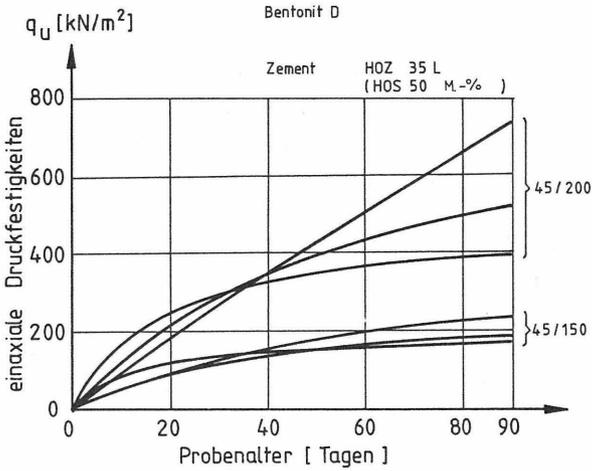


Bild 88: Festigkeiten in Abhängigkeit von der Bentonitsorte

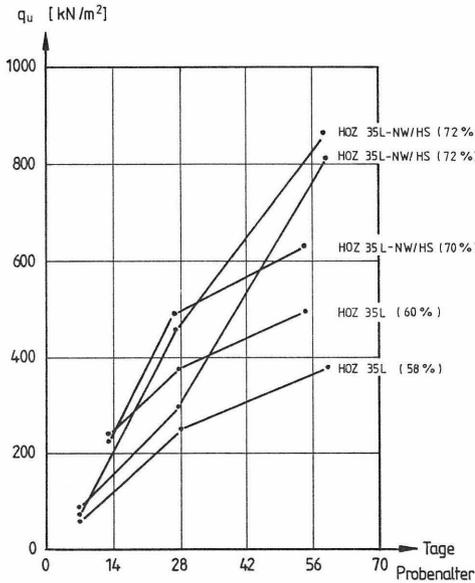


Bild 89: Einfluß der Zementsorte auf die Druckfestigkeitsentwicklung von Dichtwandmassen der Mischung 38/200 (Geil,1982)

9.2.2 Ca-BZS

Die Festigkeitsentwicklung von Ca-BZS ist vornehmlich bis zum 56. Tag von der Trockenmasse (Bentonit und Zement) abhängig (Bild 90). Danach sind je nach Bentonit- und Zementkonzentration Unterschiede im Anstieg der Festigkeiten bis zum 112. Tag erkennbar (Bild 89).

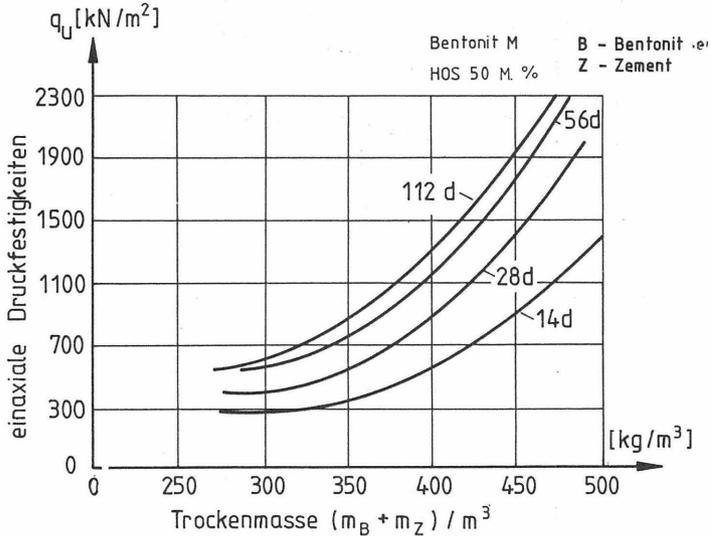


Bild 90: Druckfestigkeiten von Ca-BZS in Abhängigkeit von der Trockenmasse und dem Probenalter

Die Erhärtung wird bei niedrigem Zementgehalt (150 kg) durch höhere Bentonitzugaben verzögert, betrachtet man den weiteren Festigkeitsanstieg zwischen dem 56. und 112. Tag der untersuchten Proben (Bild 91). Bei den Mischungen 200/200 und 250/200 steigen die Festigkeiten zwischen dem 56. und 112. Tag kaum an. Gleiches gilt für die Mischungen 250/250 und 150/150, d.h. bei höherem Zementgehalt (> 200 kg) wird die Erhärtung durch Bentonitzugaben (≥ 200 kg) zu diesem Zeitpunkt nicht mehr beeinflusst.

Die Festigkeitsentwicklung ist weniger durch die Bentonitsorte bestimmt, als von der Zementsorte abhängig (Bild 92).

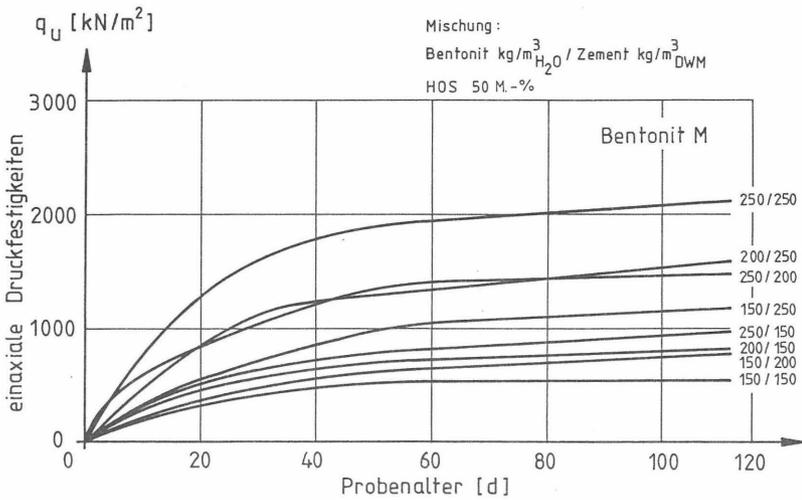


Bild 91: Festigkeitsentwicklung aushärtender Ca-BZS

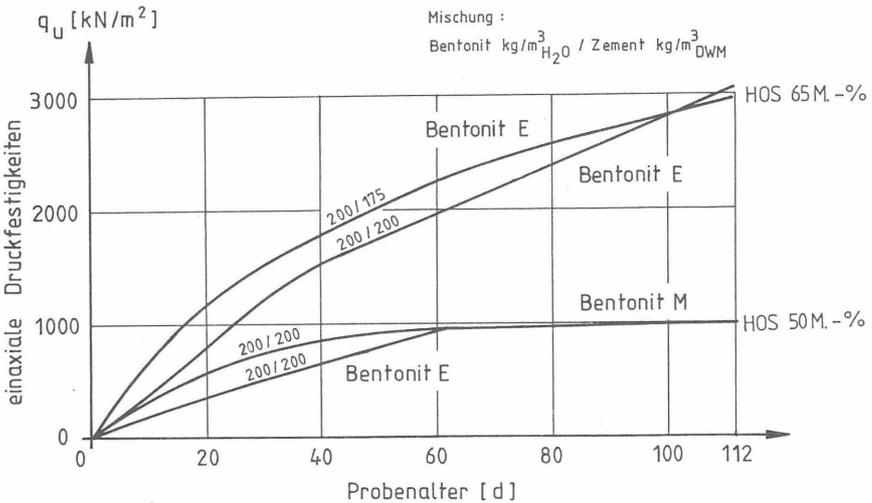


Bild 92: Festigkeitsentwicklung aushärtender Ca-BZS in Abhängigkeit von Bentonit- und Zementsorte

9.3 Einfluß der Erhärtung auf die Wasserdurchlässigkeit

Um die Beständigkeit von DWM bereits früh beurteilen zu können, kann es sinnvoll sein, die Proben mit geringem Probenalter in die Triaxialzellen einzubauen und die Durchlässigkeitsversuche durchzuführen. Für die Untersuchung der Dauerhaftigkeit ist es notwendig, neben dem Chemismus, der beim Durchströmen der Proben abläuft, besonders die Veränderung der Durchlässigkeit über die Zeit zu untersuchen. Die Durchlässigkeit entwickelt sich parallel zur Erhärtung der Dichtwandmassen. Daher muß vor Beginn der Untersuchungen der Aushärtungsgrad der Dichtwandmassen bekannt sein, der meist über die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit beurteilt werden kann.

Zur Erstellung der Zeitabhängigkeit von Durchlässigkeit und Festigkeit wurden Untersuchungen an erhärtenden und ausgehärteten Proben durchgeführt und dabei der Einfluß der Erhärtung auf den k -Wert geprüft.

Mit zunehmendem Probenalter werden die Durchlässigkeitsbeiwerte k , in Triaxialzellen mit $i = 30$ und 60 gemessen, geringer. Bei Verwendung eines Na-Bentonits ist die Wasserdurchlässigkeit stark von der Zementsorte bzw. Zementgehalt geprägt (Bild 93). Die BZS mit Ca-Bentoniten erreichen wegen der höheren Feststoffkonzentration deutlich geringere k -Werte.

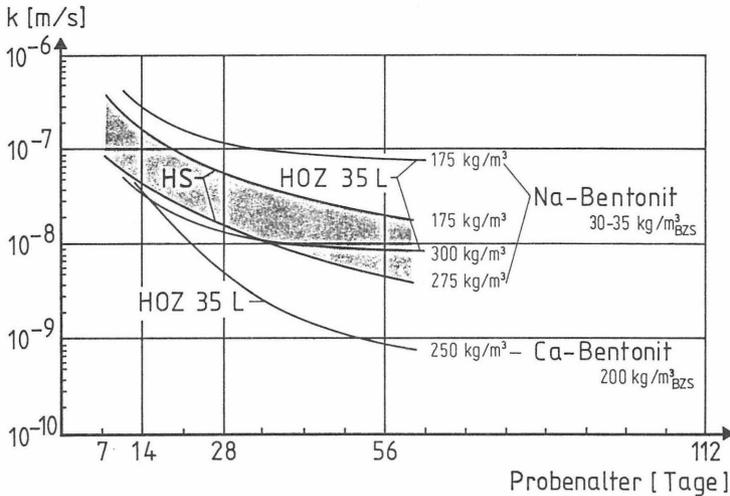
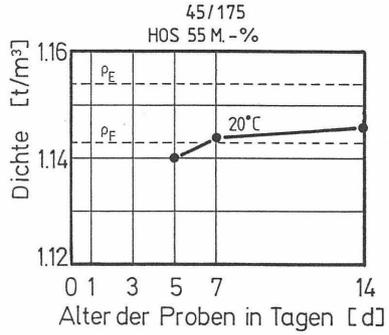
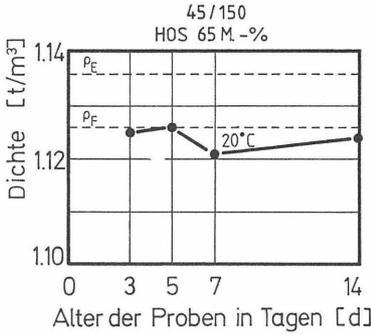


Bild 93: Entwicklung der Durchlässigkeit von BZS in Abhängigkeit vom Probenalter und der Zusammensetzung (Geil, 1982)

Entsprechend den zu Beginn der Hydratation von Dichtwandmassen rasch ansteigenden Festigkeitswerten verläuft die Durchlässigkeitsentwicklung umgekehrt proportional zur Zeit.

Die Gegenüberstellung der ermittelten Dichten und Wassergehalte von 1 bis 28 Tage alten Proben mit den berechneten Werten ρ_E und w_E ergibt, daß die Proben nach 28 Tagen noch nicht ausgehärtet sind (Bild 94 und 95). Untersuchungen über die Veränderung von Dichte, Wassergehalt, einaxialer Druckfestigkeit und Durchlässigkeit an einer Mischung 35/200 (Bild 96) weisen nach, daß auch nach 280 Tagen die Festigkeiten ansteigen, die Dichten zu diesem Zeitpunkt jedoch nahezu konstant bleiben; die zeitliche Veränderung der k -Werte ebenfalls die noch nicht abgeschlossene Erhärtung verdeutlichen.

Bentonit D

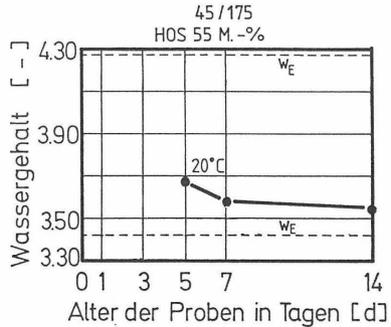
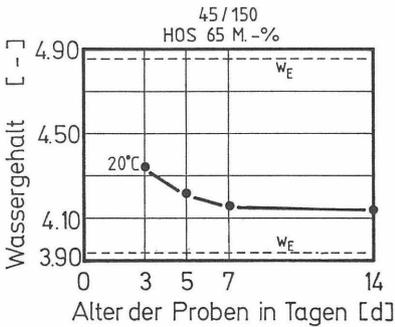


a) Mischung 45/150

b) Mischung 45/175

Bild 94: Dichten von erhärtender Na-BZS als Funktion des Probenalters

Bentonit D



a) Mischung 45/150

b) Mischung 45/175

Bild 95: Wassergehalte von erhärteten Na-BZS als Funktion des Probenalters

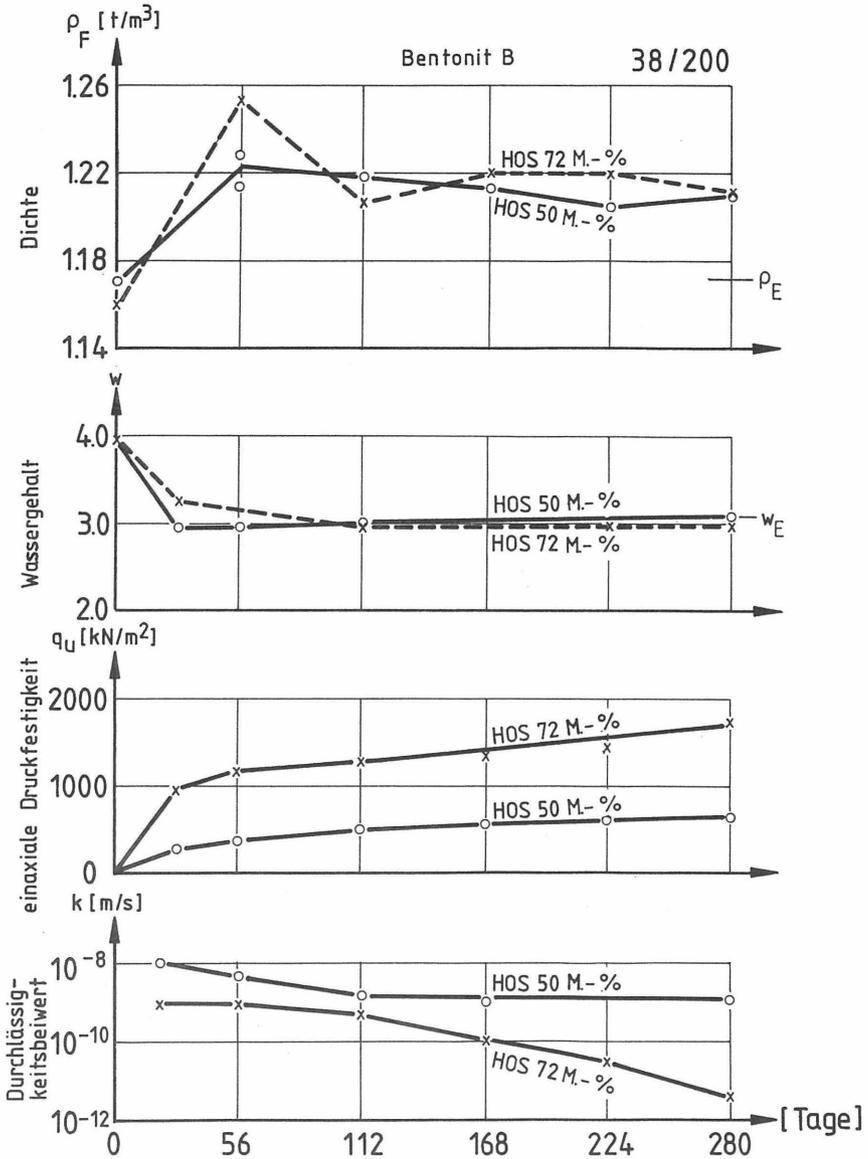


Bild 96: Dichte, Wassergehalt, einaxiale Druckfestigkeit und Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit vom Probenalter

9.3.1 Hydratationsgrad nach 28 Tagen

Die Berechnung der Korndichten aus den ermittelten Feuchtdichten und Wassergehalten der Mischungen 45/150 und 45/175 ergab, daß nach 28 Tagen die Hydratationsgrade 74,6 und 82,6 % betragen. Diese Werte stimmen in etwa mit dem Hydratationsgrad von HOZ bei einem W/Z-wert ca. 0,5 von 60 - 70 % (Krenkler, 1980) überein (Bild 82). Für Ca-BZS liegt zu diesem Zeitpunkt ein Hydratationsgrad von 30 % vor.

9.3.2 Wasserdurchlässigkeit ausgehärteter Proben

9.3.2.1 Na-BZS

Für die Mischung 45/150 mit Zement (HOZ 65 %) konnten die ermittelten Hydratationsgrade und der Erhärtungsverlauf über die zeitabhängigen Meßwerte von ρ_d , q_u und k gezeigt werden (Bild 97).

Nach 60 Tagen muß die Hydratation des Zementes nahezu abgeschlossen sein, da sich der k -Wert kaum noch änderte. Die Dichte der Proben lag aber über dem theoretischen Wert ρ_E , das erklärt den weiteren Anstieg der Festigkeiten, weil sich vermutlich neue Phasen, die die Durchströmung nicht beeinflussen, bilden. Aus Bild 96 ist erkennbar, daß sich der Wassergehalt bei der Mischung 38/200 mit 50 M.-% HOS nach 28 Tagen dem w_e -Wert nähert und der k -Wert zu diesem Zeitpunkt nahezu konstant bleibt. Mit 72 M.-% HOS nähert sich der Wassergehalt dem w_e -Wert nach 112 Tagen. Der für die Durchströmung wirksame Porenraum des nicht gebundenen Wassers ist 112 Tage nach der Herstellung nahezu konstant. Je nach Bentonit- und Zementsorte haben die DWM unterschiedliche k -Werte (Bild 98).

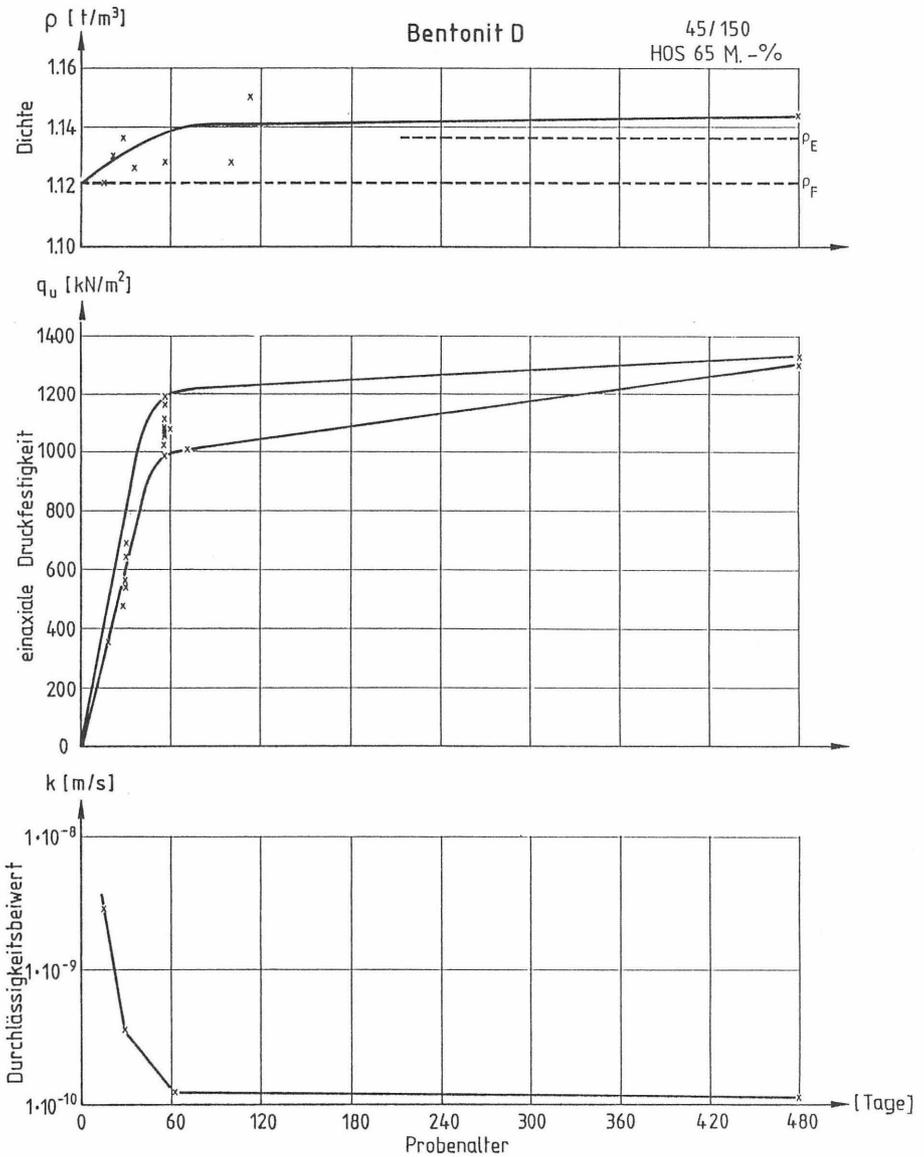


Bild 97: Dichte, einaxiale Druckfestigkeit und Durchlässigkeit aushärtender Dichtwandmassen

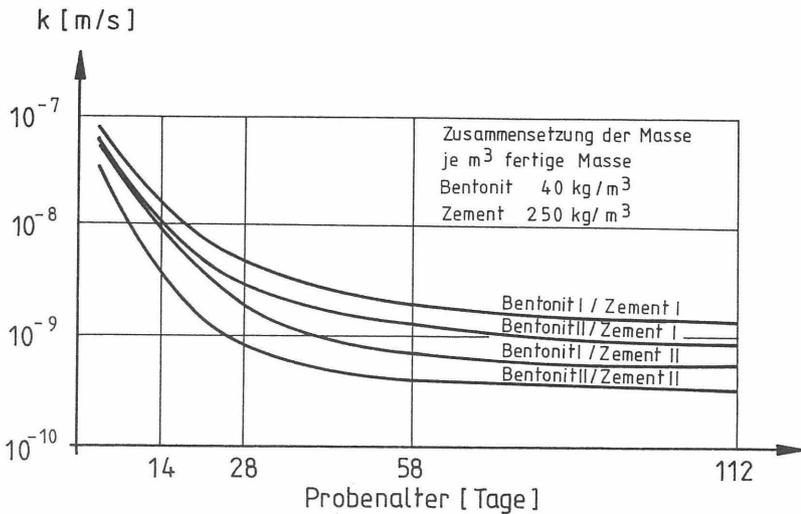


Bild 98: Durchlässigkeiten unterschiedlicher Dichtwandmassen in Abhängigkeit vom Probenalter (Simons, Geil, Hänsel, 1982)

In Bild 99 ist das Porenvolumen, gefüllt mit nicht gebundenem Kapillarwasser, ausgehärteter Na-BZS aufgetragen. Die Mischung 45/150 hat damit fast das gleiche Porenvolumen wie die Mischung 40/200. Anhand ausgehärteter Proben mit vergleichbaren Bentonit- und Zementsorten konnte nachgewiesen werden, daß diese Proben in etwa ähnlich k-Werte haben (Bild 100). Das gleiche gilt für die Mischungen 45/200 und 40/250. Für die Auswahl beständiger DWM ist damit auch das Porenvolumen des nicht gebundenen Kapillarwassers zu berücksichtigen. Durch Reduzierung der Zementmenge und Erhöhung der Bentonitmenge kann z.B. die Resistenz der DWM erhöht werden, ohne daß sich der k-Wert erhöht.

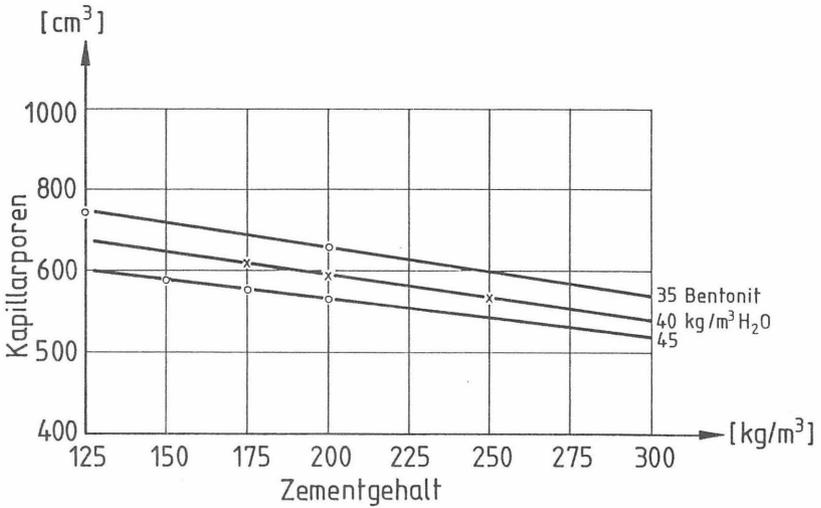


Bild 99: Porenvolumen ausgehärteter Na-BZS, mit nicht gebundenem Wasser gefüllt

Mischung	Bentonit-sorte	Zement-sorte HOS [Gew.-%]	Porenvolumen nicht gebundenes Kapillarwasser [cm³] pro 1 DWM	Probenalter [d]	Wasserdurchlässigkeit k [m/s]
40/200	D	72	594,4	889	$4,0 \cdot 10^{-10}$ $3,4 \cdot 10^{-10}$
45/150	D	65	589,5	485	$1,4 \cdot 10^{-10}$
40/250	B	55	565,2	681	$4,6 \cdot 10^{-9}$
45/200	C	55	564,8	679	$6,8 \cdot 10^{-9}$

Bild 100: Wasserdurchlässigkeit ausgehärteter DWM mit etwa gleichem Porenvolumen

9.3.2.2 Ca-BZS

Untersuchungsergebnisse über lange Zeiträume lagen vor Durchführung der Beständigkeitsversuche nicht vor. Betrachtet man den gegenüber Na-BZS weitaus geringeren W_R/Z -Faktor bei Ca-BZS, so füllen sich bei gleicher Reaktionsgeschwindigkeit die Porenräume der Ca-BZS schneller mit Zementhydratphasen. Es ergibt sich daraus, daß die Kurven, die den zeitlichen Verlauf von Dichte, Festigkeit und Wasserdurchlässigkeit darstellen, gegenüber Na BZS steiler verlaufen und die Dichte rascher dem Endwert zustrebt (Bild 101).

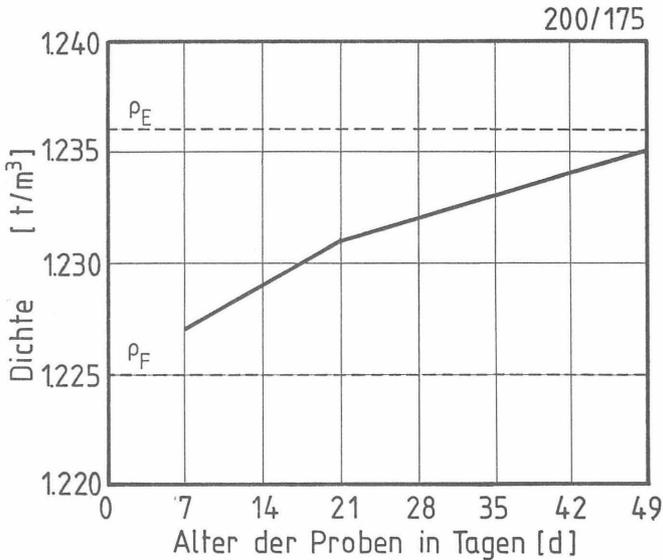


Bild 101: Dichte in Abhängigkeit vom Probenalter

Die Durchlässigkeit aushärtender Ca-BZS ist primär abhängig vom Porenvolumen (Bild 102) und den Festigkeiten (Bild 91). Aufgrund des geringen Festigkeitsanstiegs zwischen dem 56. und 112. Tag und der geringfügigen Verbesserung des k-Wertes in diesem Zeitpunkt sind die Mischungen 150/150, 150/200, 200/200, 250/200 und 250/250 nahezu ausgehärtet. Der Vergleich mit ausgehärteter Na-BZS (40/200) mit gleichem Zement ergibt eine gute Übereinstimmung der Porenzahlen und k-Werte. Die Durchlässigkeit ändert sich auch bis zu 280 Tagen kaum noch.

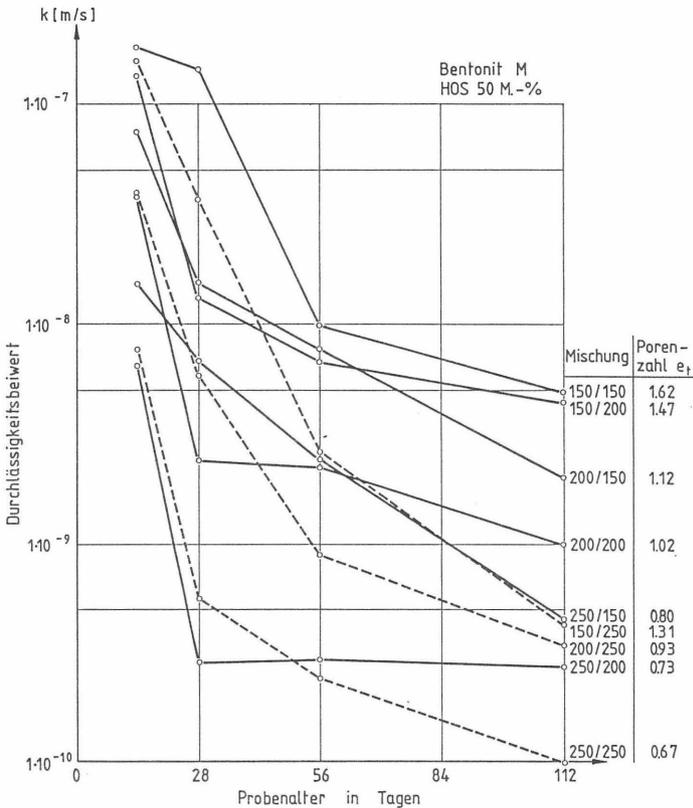


Bild 102: Durchlässigkeit aushärtender CA-BZS in Abhängigkeit vom Probenalter und der Porenzahl

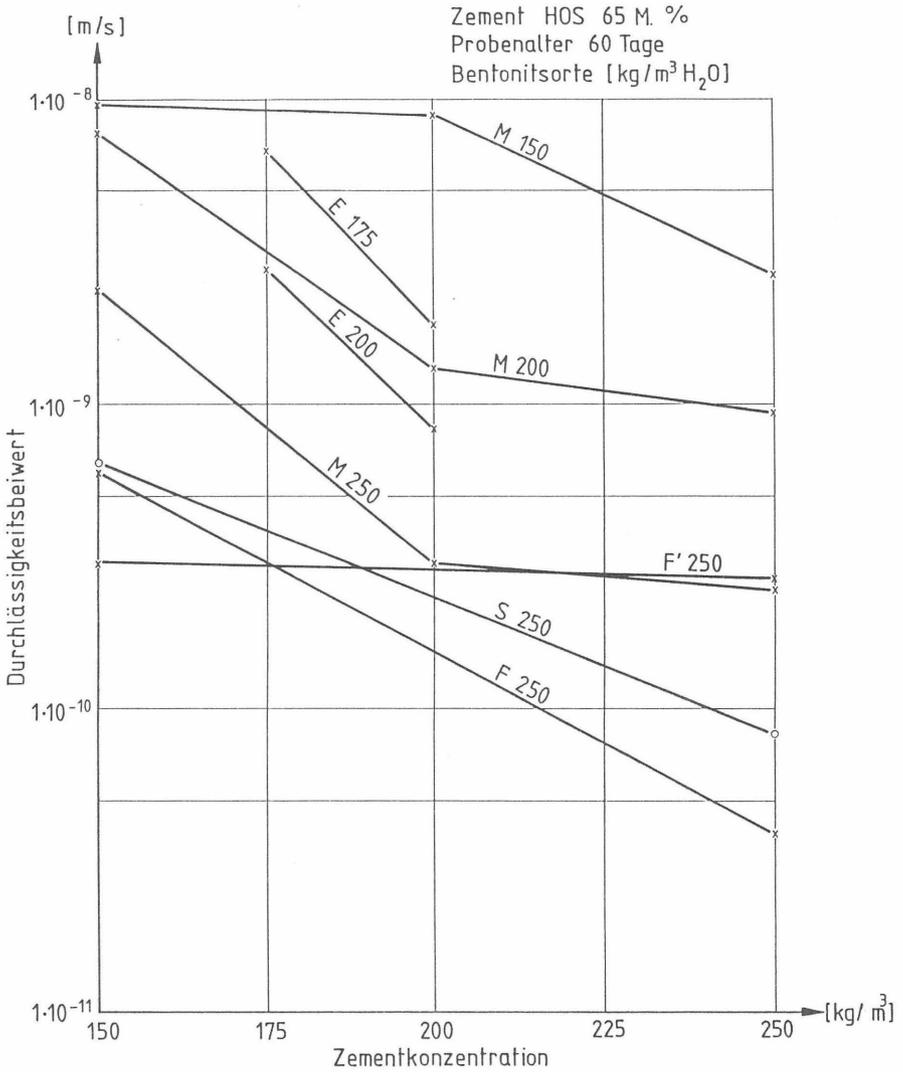


Bild 103: Durchlässigkeit aushärtender Ca-BZS in Abhängigkeit von der Bentonit- und Zementkonzentration

Bentonit [kg/m ³ H ₂ O]	Zement [kg/m ³ DWM]	Proben- alter [d]	Poren- zahl [-]	Durchlässigkeits- beiwert k [m/s]
Ca-BZS				
150	150	112	1,62	4,8 · 10 ⁻⁹
150	200	112	1,47	3,0 · 10 ⁻⁹
Na-BZS				
40	200	889	1,47	2,9 · 10 ⁻⁹
Ca-BZS				
200	200	112	1,02	1,0 · 10 ⁻⁹
250	200	112	0,73	1,6 · 10 ⁻¹⁰

Bild 104: Porenvolumen ausgehärteter Dichtwandmassen mit Ca-Bentonit M und Na-Bentonit B sowie Zement HOZ 35 L (HOS 50 M.-%)

9.4 Einfluß der Prüfflüssigkeit auf die Wasserdurchlässigkeit

Die Untersuchung des Durchlässigkeitsverhaltens vergleichbarer Mischungen verdeutlicht, daß neben der verwendeten Bentonitsorte und Zementsorte auch die Prüfflüssigkeit (Bild 105) eine große Rolle spielt. Die Durchströmung mit Grund- und Leitungswasser, gekennzeichnet durch eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von 600 bis 1200 µS/cm und einer Gesamthärte von 13 bis 23° dH, brachte bei Verwendung gleicher Bentonitsorte und Zementen mit gleichem HOS-Anteil und Mahlfeinheit geringere k-Werte (Blinde 1985) als bei den vorliegenden Versuchen mit Braunschweiger Leitungswasser.

Bei der Durchströmung mit Aqua-dest. ergaben sich nach Untersuchungen von Blinde (1985) höhere Durchlässigkeiten, besonders bei geringerem Probenalter. Das bedeutet für weitere Untersuchungen, daß bei den Durchlässigkeitsversuchen immer die Prüfflüssigkeit berücksichtigt werden muß.

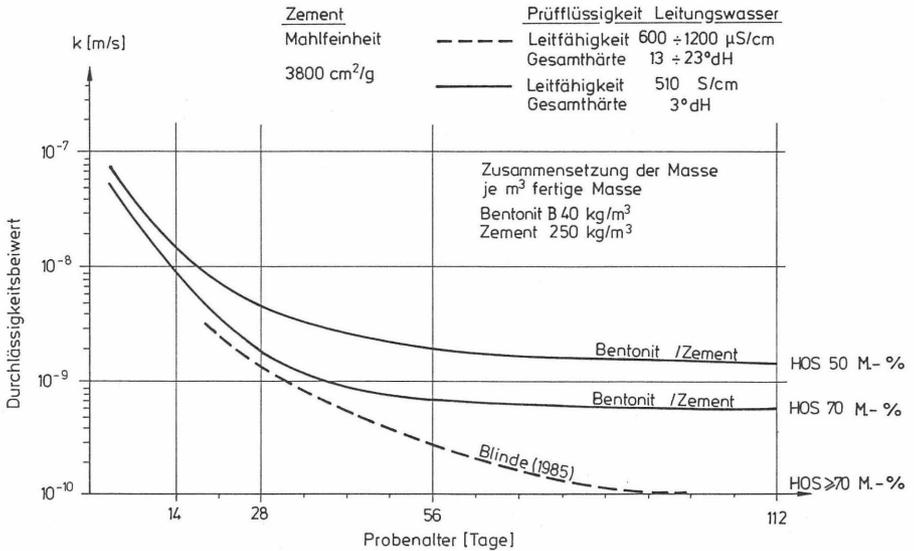


Bild 105: Einfluß der Prüfflüssigkeit auf die Wasserdurchlässigkeit

9.5 Zusammenfassung und Folgerungen

Die zeitliche Änderung der einaxialen Druckfestigkeiten steht in einem direkten Zusammenhang mit den Viskositäten der frischen Proben. Die Bentonite B und C in den BZS bewirken vornehmlich mit den niedrigem HOS-Anteil im Zement geringe Auslaufzeiten aus dem Marsh-Trichter und geringe Festigkeiten. Bentonitsuspensionen bilden durch die Kartenhausstruktur der Bentonitlamellen ein

nahezu dichtes Raster. Portier (1984) stellte durch elektronenmikroskopische Aufnahmen von Na-BZS mit Bentonit B fest, daß sich bei Zugabe von Zement durch den Kalk die Bentonitlamellen zu einer Art Wabe verkleben und sich mit zunehmenden Kalkmengen sogar "kräuseln", d.h. die Bentonitplättchen rollen sich teilweise zusammen. Aus diesen Aufnahmen ist ersichtlich, daß bei Verwendung von Zementen mit geringerem Kalkgehalt (hoher HOS-Anteil) die Kristallisation der erhärteten Bentonit-Zement-Mischung unvollständig ausgeprägt ist und die ausgebildeten Strukturen sich nach dem von der Bentonitsuspension gebildeten Raster verhalten. Der stark im Überfluß vorhandene Kalk (geringer HOS-Anteil) hat ein Agglomerisationsvermögen, welches dazu führt, daß die Bentonitmembranen im Raster nahezu vollständig verschwinden, dafür aber zusammengerollte Plättchen aus hydratisiertem Calciumsilikaten vorhanden sind. Es bildet sich in diesen BZS durch die gekräuselten Bentonitlamellen und nadelförmigen Strukturen eine mit Hohlräumen versehene Fläche aus, im Gegensatz zu der kontinuierlicheren und räumlich besser verteilten Struktur der BZS mit hohem HOS-Anteil.

Die in Abhängigkeit vom Kalk des Zementes und Reaktivierung des Bentonits sich bildende Struktur der erhärteten BZS (Dichtwandmasse) ist daher auch für die Durchlässigkeit der Dichtwandmassen maßgebend. Dichtwandmassen mit "kartenhausstruktur"-ähnlichen Bentonitlamellen in einer (nur) lockeren Packung faseriger Strukturelemente der Zementhydratationsprodukte besitzen eine geringere Durchlässigkeit als solche mit einer mehr oder weniger gut ausgebildeten "nadelfilz"-ähnlichen Struktur mit geringen Bentonitmembranen. So wird deutlich, daß bei den ausgehärteten Na-DWM mit den Bentonitsorten B und C und dem geringeren HOS-Anteil trotz geringerem Porenvolumen eine höhere Durchlässigkeit vorliegt als bei der Mischung mit Bentonit D und 65 bis 72 % HOS-Anteil im Zement (Bild 101).

Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Ca-BZS liegen nicht vor. Da eine Reaktivierung des Bentonites entfällt, wird die Struktur von einer gegenüber Na-Bentoniten nicht sehr ausgeprägten Bento-

nitmembranen mit je nach HOS-Anteil nadel- oder faserig, in einer schlecht lockeren Packung von kristallisierten Kristallen vorhanden sein. Aus Bild 103 wird deutlich, daß bei geringeren Bentonitgehalten (150 kg/m^3) und Zementgehalten von 150 kg auch die k-Werte zwischen 14 und 28 Tagen Probenalter nur im Bereich von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ liegen. Die erreichbare Durchlässigkeit wird vornehmlich von dem Porenvolumen des nicht gebundenen Wassers bestimmt.

9.6 Auswahl von BZS für Dauerversuche

Die Entwicklung der Wasserdurchlässigkeit erhärtender Dichtwandmassen im Alter bis 56 Tage ist stark von der Bentonitsorte und -konzentration geprägt, wobei dann der k-Wert sowohl bei Na- und Ca-BZS bei Verwendung von Zementen mit geringem HOS-Anteil bis zum Probenalter von 280 Tagen nahezu konstant bleibt. Bei höherem HOS-Gehalt in Na-BZS tritt in Abhängigkeit von der Bentonitkonzentration zwischen dem 56. und 160. Tag (Blinde, 1985) eine Verbesserung bis zu einer halben Zehnerpotenz auf.

Die Wasserdurchlässigkeit an ausgehärteten Proben zeigt recht deutlich, daß neben der Bentonitsorte und Zementsorte auch die Porenzahl die Durchlässigkeit bestimmt. Insgesamt gesehen wird der erreichbare k-Wert aber immer im Zusammenspiel zwischen Bentonitsorte und Zement zu sehen sein. Der Vergleich der REM-Aufnahmen untersuchter DWM (Portier, 1984) mit einem sulfatbeständigen Zement zeigt geringere Hohlräume auf als eine Probe mit geringem HOS-Anteil im verwendeten Zement. Diese BZS sind gekennzeichnet durch hohe Auslaufzeiten nach der Herstellung mit anschließender Verflüssigung, d.h. Verringerung der Auslaufzeiten. Im erhärteten Zustand erreichen diese Mischungen auch höhere k-Werte. Durch Auswahl eines Bentonites mit geringem Ionenaustauschvermögen und höherem HOS-Anteil im verwendeten Zement ist es möglich, verarbeitbare Mischungen mit geringen Filtratwasserabgaben im frischen Zustand und geringen k-Werten im erhärteten Zustand zu bekommen.

Der Bentonit soll durch geringes Ionenaustauschvermögen, Zementstabilität und in einer hohen Konzentration in der DWM den Zement vor dem chemischen Angriff von Prüf Flüssigkeiten bei der Durchströmung schützen. Hinsichtlich Verarbeitung und Stabilität haben sich die in Bild 106 dargestellten Materialzusammensetzungen als günstig erwiesen. Sie wurden aus den Ergebnissen der Viskositäts- und Stabilitätsprüfungen (Bilder 51, 52, 55 und 63, Abschnitt 7) und Prüfung der Wasserdurchlässigkeit (Bilder 97 + 103, Abschnitt 9) beurteilt und nach folgenden Kriterien ausgewählt:

1. Die Auslaufzeiten sollten zwischen 45 und 60 Sekunden (Caron, 1972) liegen und sich in Rührversuchen nur geringfügig ändern.
2. Die Filtratwassermengen sollten möglichst gering sein und bei Na-BZS 100 ml bzw. bei Ca-BZS 150 ml nicht überschreiten.
3. Die einaxialen Druckfestigkeiten sollten nach 28 Tagen $\geq 350 \text{ kN/m}^2$ betragen, um ausreichende Erosionssicherheit zu garantieren.
4. Die Wasserdurchlässigkeit sollte in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad nach 28 Tagen für Na-BZS unter $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ liegen und für Ca-BZS im Bereich von $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ liegen.

Ca-Bentonit E

HOZ 35L

Konzentration kg/m ³ Wasser	Konzentration kg/m ³ DwM	Konzentration kg/m ³ DwM
200	175	175

Na-Bentonit D

HOZ 35L

Konzentration kg/m ³ Wasser	Konzentration kg/m ³ DwM	Konzentration kg/m ³ DwM
45	42	150
45	42	175

Prüfflüssigkeiten für Dauerversuche

Aqua-dest.

Säure

H₂SO₄

1%ige Lösung
0,5%ige Lösung

Lauge

NaOH

10%ige Lösung

Zementorte
HOS 65 M.-%

Salz

NH₄Cl

300 mg/l NH₄⁺

Bild 106: Versuchsmatrix

10 Prüfmethoden zur Untersuchung der Dauerbeständigkeit

Ein Ziel dieser Untersuchungen war es, die Dauerbeständigkeit durch zeittraffende Prüfmethoden zu untersuchen. Dazu wurde die in Bild 106 dargestellte Versuchsmatrix ausgewählt.

10.1 Chemismus beim Durchströmen von Proben mit Prüfflüssigkeiten

Die chemische Reaktion zwischen DWM und durchströmendem Medium läßt sich vereinfacht darstellen als Lösung eines Calciumsalzes (Calciumhydroxid, Calciumcarbonat) im Wasser. Beim Durchströmen der Probe geht ein Teil des Salzes in Lösung und zwar soviel, bis die Lösung gesättigt ist.

Bei der Hydratation stellt sich eine an Calciumhydroxid gesättigte Lösung in der Probe ein. Wird die Probe durchströmt, so gehen die größeren Kristalle des Calciumhydroxids in Lösung und werden ausgespült. Da ein bestimmter Anteil von Calciumhydroxid im Zementstein erforderlich ist, zerfällt ein Teil des Calciumsilikathydrats in Calciumhydroxid und Kieselsäure. Dadurch wird der für die Stabilität des restlichen Calciumsilikathydrats notwendige Gleichgewichtszustand wieder hergestellt.



Bei der Zementkorrosion ist zu unterscheiden zwischen lösendem Angriff, bei dem lösliche Bestandteile des Zementsteins herausgelöst werden, und treibenden Angriff, bei dem durch chemische Umsetzung im Zement kristalline Stoffe entstehen, die aufgrund ihres großen Volumens ein Treiben und Sprengen des Zementsteins bewirken.

Korrosionsneigung der Zement-Hydrate

	Hydratations- produkte im Zementstein	Schädliche Umsetzungen	a) weiches Wasser	b) saures CO ₂ -Wasser	c) Sulfat- wasser
1	Calcium- hydroxid Ca(OH) ₂	a) 1,2 g/l löslich b) 165 g/l " c) keine Reaktion			
2	Calciumsilikat- hydrat 3CaO·2SiO ₂ ·H ₂ O	a) fast unlöslich b) wenig löslich c) keine Reaktion			
3	Calciumaluminat- hydrat 4CaO·Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	a) unlöslich b) fast unlöslich c) starke Reaktion			
4	Calciumaluminat- ferrithydrat 4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	a) unlöslich b) fast unlöslich c) keine Reaktion			

kein Angriff = ○ schwacher Angr. = ◐ mittlerer Angr. = ◑ starker Angr. = ◒

Lösender Angriff (1b)
durch weiches Wasser
kohlen-saures Wasser
anorganische Säuren u.a.
z.B. $\text{Ca} \begin{matrix} \text{O} \\ \text{H} \end{matrix} + 2\text{H}_2\text{CO}_3$
= $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
= Calc.-Bicarbonat (wasserlös.)

Treibender Angriff (3c)
durch Sulfate
Magnesiumsalze und
amorphes SiO₂
z.B. $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
= $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
Ettringit

Bild 107: Korrosionsneigung der Zement-Hydrate (Krenkler, 1980)

10.2 Versuchsparameter

Das Dauerverhalten bei der Durchströmung kann anhand folgender Parameter abgeschätzt werden:

- Ausspülungsrate A
- hydraulischer Gradient i
- Versuchsdauer t
- Prüfflüssigkeit

In Übereinstimmung mit Strobl (1982) wird definiert:

Ausspülungsrate A: Sie stellt das Verhältnis des ausgespülten Calciums zu dem in der Probe vorhandenen und in die Probe eingebrachten Calcium dar. So bedeutet eine Ausspülungsrate von $A = 0,10$, daß 10 % des in der Probe vorhandenen Calciums während der Versuchsdauer ausgespült wurden. Daneben wird je nach Prüfflüssigkeit die Ausspülung von Cl^- , SO_4^{2-} und NH_4^+ sowie pH-Wert und Leitfähigkeit an der ausströmenden Flüssigkeit bestimmt.

Hydraulischer Gradient i: Die Durchlässigkeitsbeiwerte $k[\text{m/s}]$ werden bei $i = 20, 30, 60$ und 100 bestimmt.

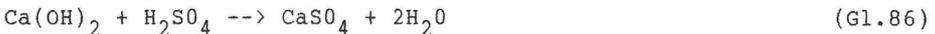
Versuchsdauer t: Die zeitraffende Prüfung des Dauerverhaltens erfordert eine Reduzierung der tatsächlichen Lebensdauer auf eine im Labormaßstab "sinnvolle" Prüfdauer. Die Beanspruchung der mineralischen Dichtungsmaterialien in situ, das heißt der Angriff betonaggressiver Stoffe auf die noch in der Aushärtung befindlichen Dichtungsmaterialien muß dabei berücksichtigt werden.

Daher wurden die DWM zu unterschiedlichen Zeiten (14 und 28 Tage Probenalter) in die Triaxialzellen eingebaut.

10.3 Prüfflüssigkeiten

10.3.1 Schwefelsäure

Schwefelsäure ist selbst in geringer Konzentration stark zementaggressiv. Sie hat eine lösende Wirkung, da das durch Neutralisation entstehende Calciumsulfat eine höhere Löslichkeit als das Calciumhydroxid hat. Sie ist aber auch für das Sulfatreiben durch die Bildung von Gips verantwortlich.



10.3.2 Natronlauge

Der Zementstein ist wegen seines hohen Gehalts an Calciumhydroxid stark basisch (pH ca. 12,5) und deshalb im allgemeinen gut laugenbeständig. Durch 10 %ige Natronlauge kann die Festigkeit des Zementsteines sogar gesteigert werden (Bild 108).

In Gegenwart amorpher Kieselsäure kann es zur Bildung von hydratisiertem Wasserglas kommen. Das ist eine elastische Substanz mit einem Wassergehalt von 10 bis 30 % und einer festigkeitsmindernden Wirkung.

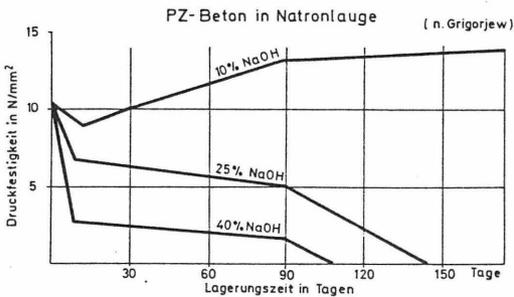
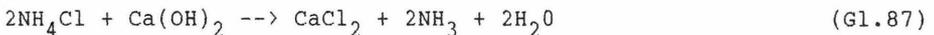


Bild 108: PZ - Beton in Natronlauge (Krenkler, 1980)

10.3.3 Ammoniumchlorid

Ammoniumchlorid gehört zu den stark betonschädigend wirkenden Salzen. Bei der Umsetzung mit Calciumhydroxid entsteht Ammoniakgas.



10.3.4 Aqua dest.

Das sich im Zementstein befindende Calciumhydroxid ist wasserlöslich (etwa 1,7 g/l). Die lösende Wirkung wird besonders durch die Durchströmung mit Aqua-dest., das ein reines, salzfreies Wasser ist, hervorgerufen. Dieses sogenannte "weiche Wasser" löst langsam Calciumhydroxid aus dem Zementstein. Nach Lösung des im Zementstein enthaltenen Ca(OH)_2 spaltet auch das Calciumsilikat-hydrat, das nur in Anwesenheit von überschüssigem Calciumhydroxid beständig ist, Ca(OH)_2 ab, das ebenfalls herausgelöst wird.

Bild 109 enthält eine Zusammenstellung der Elektrolyte einschließlich chemischer Analyse und der Beurteilung des Angriffsgrades nach DIN 4030.

Elektrolyt	Konzentration	pH	κ μs	SO_4 mg/l	NH_4^+ mg/l	Cl^- mg/l	Angriffs- grad nach DIN 4030
$\text{H}_2 \text{SO}_4$	0,5 %	0,6	22500	4898	-	-	sehr stark
$\text{H}_2 \text{SO}_4$	1,0 %	0	41800	9796	-	-	sehr stark
$\text{NH}_4 \text{Cl}$		6,4	2000	-	300	583	sehr stark
NaOH	10 %	13,4	∞	-	-	-	-

Bild 109: Charakterisierung der Prüf Flüssigkeiten

10.4 Durchführung der Beständigkeitsversuche

10.4.1 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes bei der Durchströmung mit Prüf Flüssigkeiten

Die Durchlässigkeit der Proben wurde in eigens für derartige Versuche entwickelten Prüfzellen (Bild 110) ermittelt. Die erhärteten Dichtwandmassen wurden von unten nach oben mit Wasser unter dem Druck $\gamma_w \cdot h_w$ durchströmt. Die die Probe umschließende Gummihülle wurde durch den Zeldruck $\sigma = \gamma_w \cdot h_w + 0.2$ bar an die Probe gepreßt. So wurden Umläufigkeiten während des Durchlässigkeitsversuches bei konstanter Druckhöhe vermieden.

Aus der dem Druck $\gamma_w \cdot h_w$ entsprechenden Wasserdruckhöhe h_w , der Höhe h und der Fläche F_A und der im Zeitabschnitt t gemessenen Wassermenge Q wird der Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] nach Darcy berechnet:

$$k = \frac{Q \cdot h}{t \cdot F_A \cdot h_w} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl.88})$$

Entgegen den Bezeichnungen der Vornorm DIN 18 130, Ausgabe November 1983, wird hier für die Fläche die Bezeichnung F_A statt A gewählt, damit keine Verwechslungen mit der in der Literatur bekannten Ausspülungsrate A auftritt.

Die Strömung durch eine Dichtwand ist sowohl von den Eigenschaften der Flüssigkeit als auch von der Dichtwandmasse abhängig.

$$K = \frac{\gamma}{\eta} \cdot K \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl.89})$$

$$\left. \begin{array}{l} \gamma = \text{Wichte} \\ \eta = \text{Viskosität} \end{array} \right\} \text{ der Flüssigkeit}$$

$K =$ spez. Durchlässigkeitsbeiwert der DWM

Bei der Strömung der Prüfflüssigkeiten durch die erhärteten DWM ist entscheidend, welche Stoffe ausgespült bzw. eingelagert werden und welcher k-Wert sich abhängig von diesen Vorgängen als Funktion der Zeit einstellt. Der Stofftransport beruht auf folgenden Transportmechanismen:

- Stofftransport = Konvektion (Strömung infolge Potential- und Druckdifferenzen)
- + Dispersion (Bewegung gelöster Stoffe durch Dichtegradienten)
- + Diffusion (molekulare Bewegung gelöster Stoffe vom Ort hoher Konzentrationen zu niedriger Konzentrationen)
- Adsorption (physik.-chemische Vorgänge am Ton)
- Zement-
korrosion (chem. Umwandlung und Eintrag
(dichtend) von Inhaltsstoffen der Prüf-
flüssigkeit in die DWM)
- + Zement-
korrosion (lösen von Zementhydratprodukt)
(lösend)

Dieser Stofftransport wird durch den Vergleich der zeitabhängigen Veränderung von k-Wert und sogenannten Wasserbilanzen, d.h. durch den Vergleich der eingetragenen zu den ausgespülten Ionen (z.B. Ausspülrate) bei den Versuchen beschrieben. Unter Berücksichtigung der chemischen Umsetzung und Korrosion, die bei der Durchströmung der erhärtenden DWM eintreten, bleibt der Einfluß der Viskosität unberücksichtigt, ebenso die Wichte, die sich bei großem Gefälle nicht auswirkt, da der Druck pneumatisch erzeugt wird und nicht durch das Eigengewicht der Flüssigkeiten. Die Durchlässigkeit wird damit beschrieben als

$$k = f(i, t, A)$$

(Gl. 90)

i = hydraulisches Gefälle

t = Alter der Probe beim Einbau

A = Ausspülrate

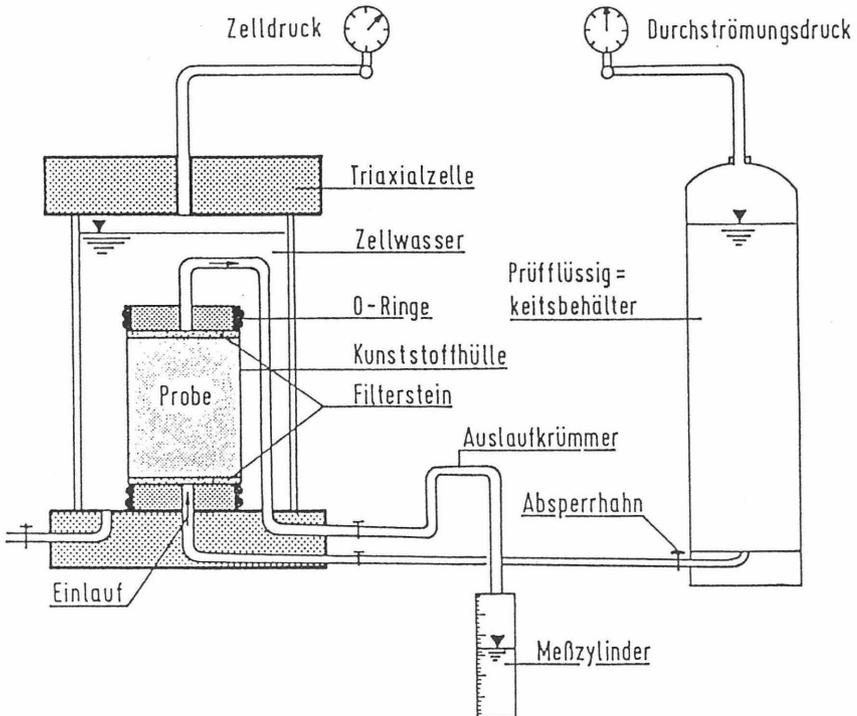


Bild 110: Verwendete Prüfwelle für Durchströmungsversuche

10.4.2 Chemische Analysen

Die Analysen wurden wie folgt durchgeführt:

- Chlorid-Bestimmung nach Mohr-Winkler durch Titration
- Sulfat-Bestimmung durch Photometrie
- Ammonium-Bestimmung durch Photometrie
- Calcium-Bestimmung durch Titration.

Daneben wurden an den ausströmenden Flüssigkeiten pH-Wert, Leitfähigkeit und Gesamthärte bestimmt.

10.4.3 Versuchsprogramm

Um eine Beurteilung der Verwendbarkeit von zeitraffenden Prüfmethoden gewinnen zu können, werden die Untersuchungen auf je eine Na- DWM und eine Ca- DWM beschränkt. Ausgehend von ersten Erfahrungen bei der Untersuchung der Na- DWM konnte das Versuchsprogramm für die Ca- DWM modifiziert werden.

Damit ergab sich das in Bild 111 dargestellte Ablaufdiagramm.

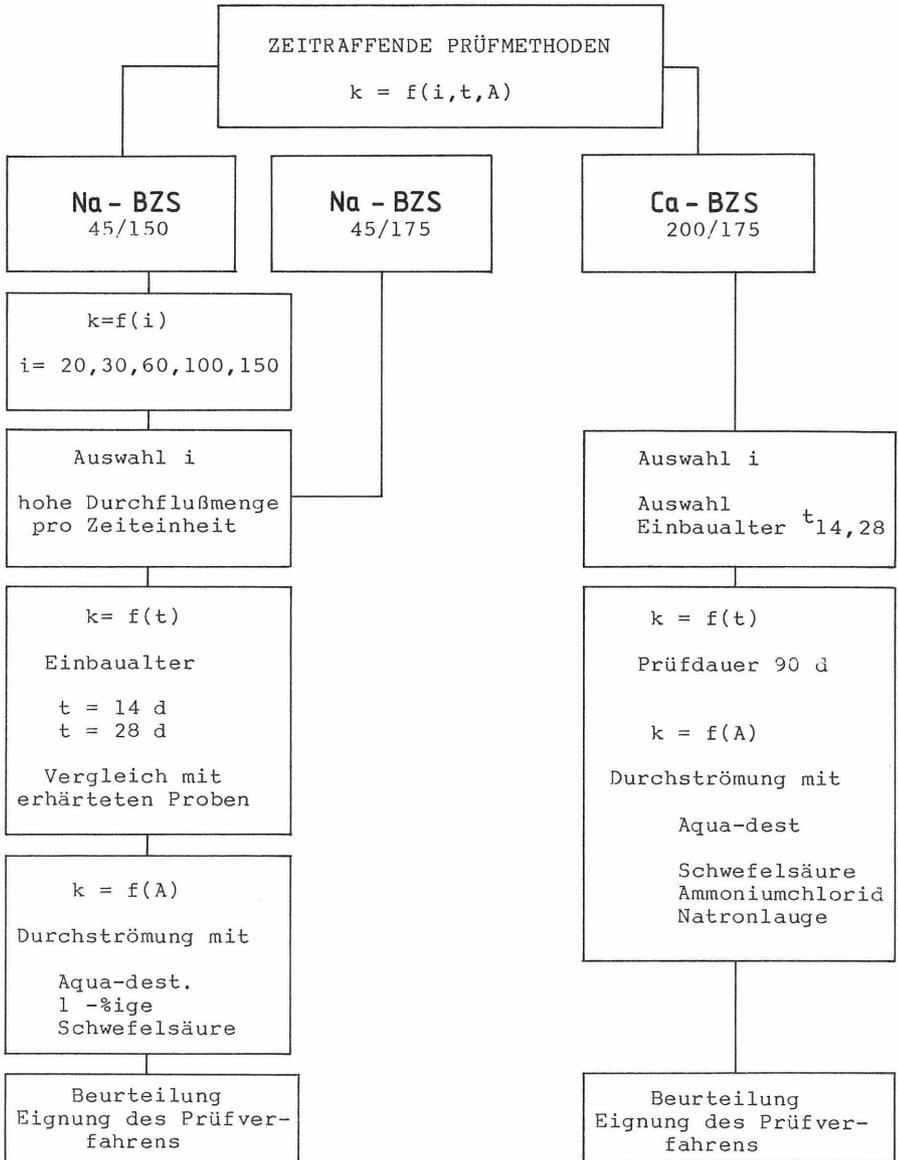


Bild 111: Ablaufdiagramm für zeitraffende Prüfmethode

11. Ergebnisse der zeittraffenden Untersuchungen

11.1 Untersuchungen an erhärtenden NA-BZS

Die ermittelten Hydratationsgrade und Festigkeiten (Abschnitt 9) ergaben, daß die Proben der Mischungen 45/150 und 45/175 bereits im Alter von 14 Tagen mechanisch der Durchströmung mit Prüfflüssigkeiten standhalten.

11.1.1 Abhängigkeit des k-Wertes vom hydraulischen Gefälle

Aus den Ergebnissen der Durchströmungsversuche mit Aqua-Dest an Na-BZS, die im Alter von 14 bis 56 Tagen mit $i = 20, 30, 60$ und 100 durchströmt wurden, geht hervor, daß bei $i = 60$ (Bild 112) die k -Werte am größten sind (Simons, Geil, Schnell 1985). Auffällig sind dabei die stetigen Verringerungen der k -Werte, die sogar eine Zehnerpotenz unter dem k -Wert ausgehärteter Proben liegen (Bild 97). Die Durchlässigkeit einer erst im Alter von 42 Tagen durchströmten Probe, die bis zum 56. Tag mit $i = 20$ durchströmt wurde, war ebenfalls größer, was die beobachtete Dichtwirkung unterstreicht.

Um einen Zeittraffereffekt zu erzielen, kann das hydraulische Gefälle nicht beliebig erhöht werden, was durch Versuchsergebnisse von Carl/Strobl (1976) und Düllmann/Heitfeld (1982) bestätigt wird. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist jedoch aufgrund anderer Versuchsbedingungen und Mischungen nicht möglich. Die Durchlässigkeiten der von den Autoren genannten Mischungen liegen um eine bis zwei Zehnerpotenzen höher, so daß sie auch eher zum Erosionsbruch führen.

Untersuchungen an einer Mischung 45/150 mit 72 M.-% HOS, die unter den genannten Versuchsbedingungen geprüft wurde, bestätigen, daß die größte Durchflußmenge bei $i = 60$ vorliegt (Bild 112). Da der Effekt zunächst nicht erklärbar ist, wurde der Einfluß von Aqua-dest. auf das Durchlässigkeitsverhalten geprüft.

45/150 HOS 65 M.-%

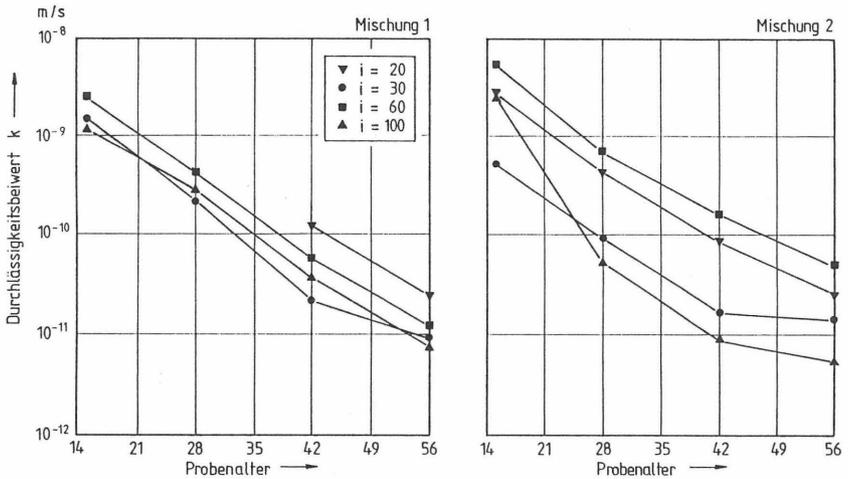


Bild 112a: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit vom Probenalter und hydraulischen Gefälle
Prüfflüssigkeit: Aqua dest

45/150 HOS 72 M.-%

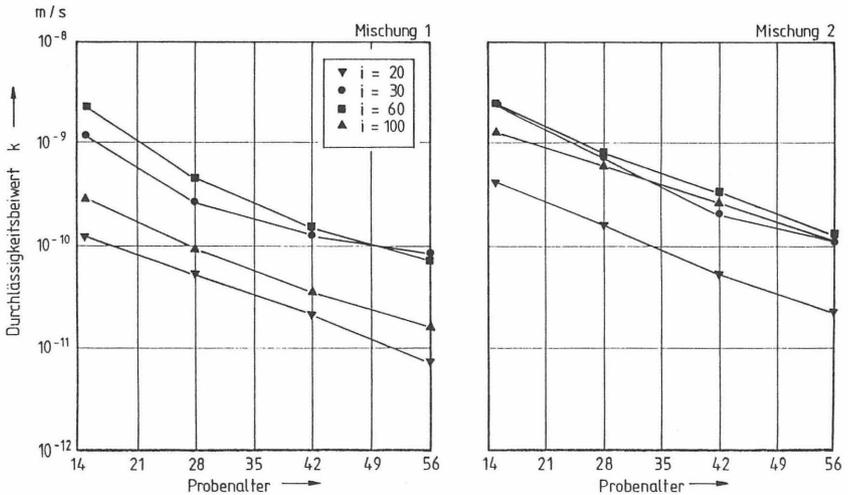


Bild 112b: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit vom Probenalter und hydraulischen Gefälle
Prüfflüssigkeit: Aqua dest

11.1.2 Einfluß der Prüfflüssigkeit Aqua dest.

Durchlässigkeitsversuche an ausgehärteten Na-BZS (38/200) mit vergleichbarem Porenvolumen (Bild 96), die erst im Alter von 300 Tagen mit Aqua dest. bei $i = 150$ durchströmt wurden, führten bei 150-tägiger Durchströmung ebenfalls zu Verringerungen des k -Wertes bis zu zwei Zehnerpotenzen, wobei der k -Wert in den ersten 56 Tagen der Durchströmung um eineinhalb Zehnerpotenzen fiel (Bild 113). Insgesamt ist festzustellen, daß bei der Durchströmung mit Aqua dest. eine Dichtwirkung erzielt wird. Wegen dieser Dichtwirkung erhält man im erhärteten Zustand (Alter 14 bis 56 Tage) keine repräsentativen Werte zur Beurteilung der Beständigkeit, da die Durchlässigkeit bis zu einer Zehnerpotenz unter dem Wert der Durchlässigkeit bei Leitungswasser liegt. Die ausgespülte Ca^{2+} -Menge betrug in den ersten 4 Tagen 2,2 mg pro Tag und verringerte sich dann auf 0,1 mg pro Tag.

11.1.3 Einfluß der Prüfflüssigkeit Schwefelsäure

Die Durchströmung mit 1 %iger Schwefelsäure bei $i = 60$ führte bei der Mischung 45/150 zu einer stetigen Abnahme des k -Wertes (Bild 114). Zwei Proben, von denen eine im Alter von 14 Tagen in die Versuchsanlage eingebaut worden waren, hatten jeweils nach 7 Tagen Durchströmung etwa gleiche Durchlässigkeiten.

Hierbei kam es zu deutlich höheren Ausspülungsraten, die Werte von Ca und Mg erreichten etwa das zehnfache gegenüber der Durchströmung mit Aqua dest., die gemessenen Ausspülungsraten liegen nach 42 Tagen um 500 mg pro Liter. Betrachtet man die Löslichkeit von Ca-Hydroxid bzw. Ca-Sulfat, so müßten die Ausspülraten bei 1700 bzw. 2000 mg/l Wasser liegen. Die Ausspülungsraten erreichen also lediglich ein Viertel der möglichen Werte. Desgleichen ist mit zunehmendem Probenalter eine Abnahme der Durchlässigkeit der Proben zu beobachten, die dem Verwitterungsprozeß entgegensteht.

Der Abdichtungsprozeß kann seine Ursache in der Bildung von mehrfach hydratisierten Ca- bzw. Magnesium-Aluminat-Sulfaten haben, die in den vorhandenen Porenraum "hineinwachsen" und somit die Durchströmbarkeit verringern.

Vergleichbare Mischungen 45/150 und 45/175 mit sulfatbeständigen HOZ (72 M.-% HOS) erwiesen sich im Prüfalter von 14 und 28 Tagen als nicht stabil oder wiesen k-Werte über $1 \cdot 10^{-8}$ auf, während ausgehärtete Proben der Mischung 38/200 mit 72 M.-% HOS bei der Durchströmung mit anorganischer Säure k-Werte zwischen $1 \cdot 10^{-9}$ und $1 \cdot 10^{-10}$ m/s hatten.

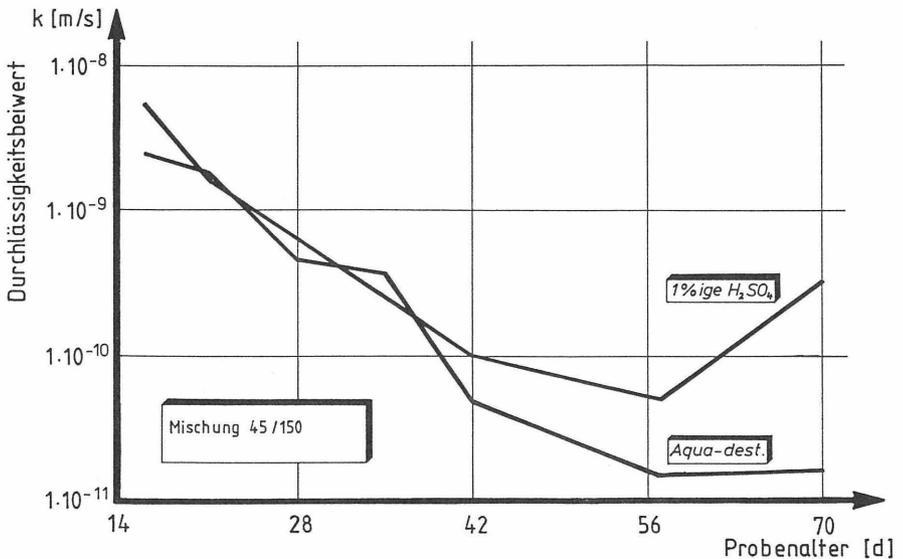


Bild 113: Durchlässigkeitsbeiwerte bei der Durchströmung mit Aqua-dist. und 1 %iger Schwefelsäure

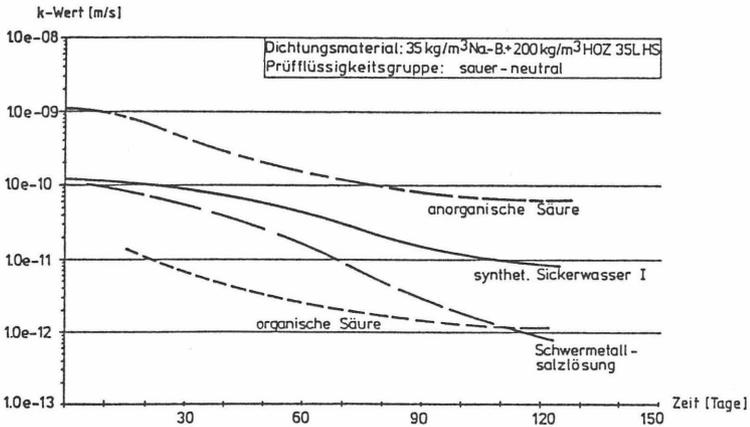
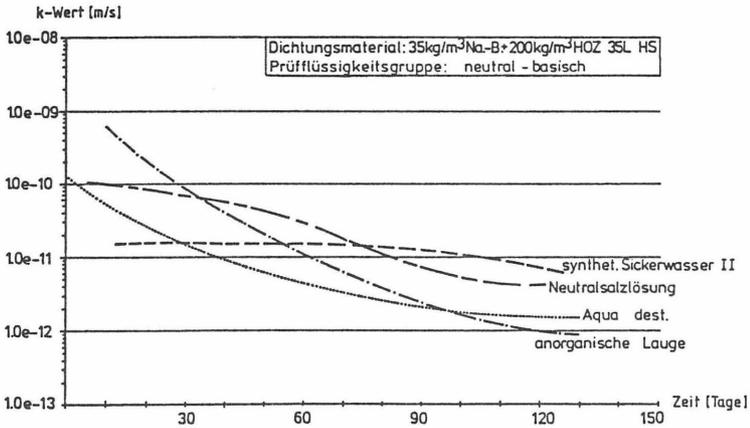


Bild 114: Durchlässigkeitsuntersuchungen an ausgehärteten Na-BZS (Reuter, 1985)

11.1.4 Beurteilung

Zeitraffende Prüfmethode durch Untersuchung der Proben von Na-BZS im Alter von 14 oder 28 Tagen und Durchströmung mit Aqua-dest. und 1-%iger Schwefelsäure bei $i = 60$ führen zu nicht repräsentativen Werten für die Beurteilung der Beständigkeit. Na-BZS sollten daher zu einem späteren Zeitpunkt (> 60 Tagen) mit hoher Konzentration (Abschnitt 10) oder zu dem oben genannten Zeitpunkt mit niedrigerer Konzentration als hier untersucht und mit einem Gefälle $i < 60$ durchströmt werden. Aqua dest. als Prüf Flüssigkeit zur zeitraffenden Prüfung der Beständigkeit von Na-BZS im Zustand der Erhärtung scheint wegen der beobachteten Dichtwirkung nicht geeignet.

11.2 Untersuchungen an erhärtenden Ca-BZS

An Proben der Mischung 200/175 wurden Durchlässigkeitsversuche bis zu 95 Tagen durchgeführt. Das hydraulische Gefälle betrug aus den erwähnten Gründen $i = 60$ (Abschnitt 11.1). Die Versuche wurden an Proben im Alter von 14 und 28 Tagen begonnen.

Beginnend im Alter von 14 Tagen wurden 7 Proben mit Aqua-dest und jeweils 2 Proben mit 0,5 %iger H_2SO_4 , 10 %iger NaOH und $NH_4 Cl$ -Lösung ($300 \text{ mg } NH_4^+/l$) durchströmt. In diesen Versuchen wurde erstmalig das Langzeitverhalten Ca-BZS unter exakt definiertem Elektrolytgriff untersucht.

Um Vergleiche zu Na-BZS ziehen zu können, wurde das Durchlässigkeits- und Festigkeitsverhalten auch bei Durchströmung mit Aqua-dest. geprüft.

Von den mit Aqua dest. durchströmten Proben wurde im Abstand von 7 Tagen jeweils eine Probe ausgebaut, die Dichte bestimmt und die einaxiale Druckfestigkeit ermittelt. So konnte über einen Beobachtungszeitraum von 49 Tagen kontinuierlich die Festigkeitsentwicklung von durchströmten Proben in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit und Durchströmungszeit ermittelt werden. Mit dem Vicat-Nadelgerät wurde an der An- und Ausströmseite die Nadeleindringung gemessen.

Bei den Proben, die mit der vergleichsweise geringen Schwefelsäurekonzentration von 0,5 %, die aber einen pH-Wert von 0,6 hat, durchströmte wurden, stellten sich nach 1 Woche Durchströmungszeit k-Werte kleiner als 10^{-8} m/s ein (Abschnitt 11.1). Daraufhin wurde eine 21 Tage alte Probe zunächst 7 Tage lang mit 1 %iger H_2SO_4 durchströmte. Die Durchlässigkeitsbeiwerte lagen nur geringfügig über denen der mit 0,5 %iger H_2SO_4 ermittelten Werten. Nach 14-tägiger Durchströmung (Probenalter 28 Tage) wurde je eine von den zwei pro Elektrolytart verwendeten Proben ausgebaut, ihre Festigkeit, Dichte und ihr Nadeleindringverhalten ermittelt.

Nach einer Erhärungszeit von 28 Tagen wurden weitere 5 Proben in die Prü fzellen eingebaut. Davon wurde eine Probe mit 10 %iger NaOH, je eine mit 1 %iger und 0,5 %iger H_2SO_4 und zwei mit NH_4Cl durchströmte.

Parallel zu den Durchlässigkeitsversuchen wurden für Vergleichszwecke alle 7 Tage die einaxialen Druckfestigkeiten an nicht durchströmten, wassergelagerten Proben bestimmt.

11.2.1 Entwicklung der Durchlässigkeit

Zunächst wird der Untersuchungszeitraum bis zu einem Probenalter von 49 Tagen betrachtet, weil hier bei den Durchlässigkeitsverläufen einiger Proben gegen Ende des betrachteten Zeitraums Veränderungen auftraten (Bilder 115 - 119).

Bild 115 zeigt die Durchlässigkeitsbeiwerte von mit Aqua dest. durchströmten Proben in Abhängigkeit vom Probenalter. Der dargestellte Verlauf ist abgesichert durch die Einzelergebnisse einer Gruppe von insgesamt 7 Einzelproben, die sich jeweils wöchentlich um 1 Probe reduzierte. Die Ergebnisse stimmten, abgesehen von der Probe Nr. 82, gut überein.

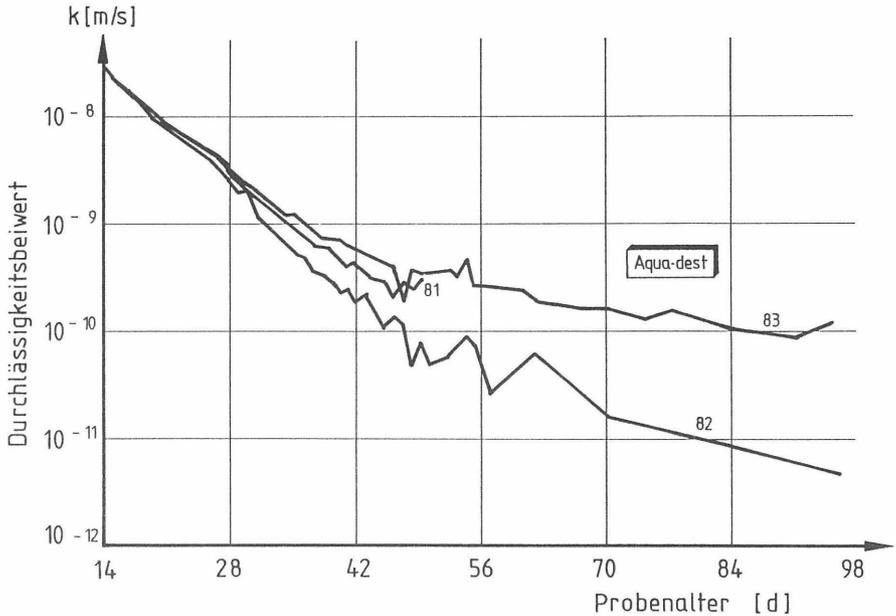


Bild 115: Durchlässigkeitsbeiwerte der mit Aqua dest. durchströmten Proben

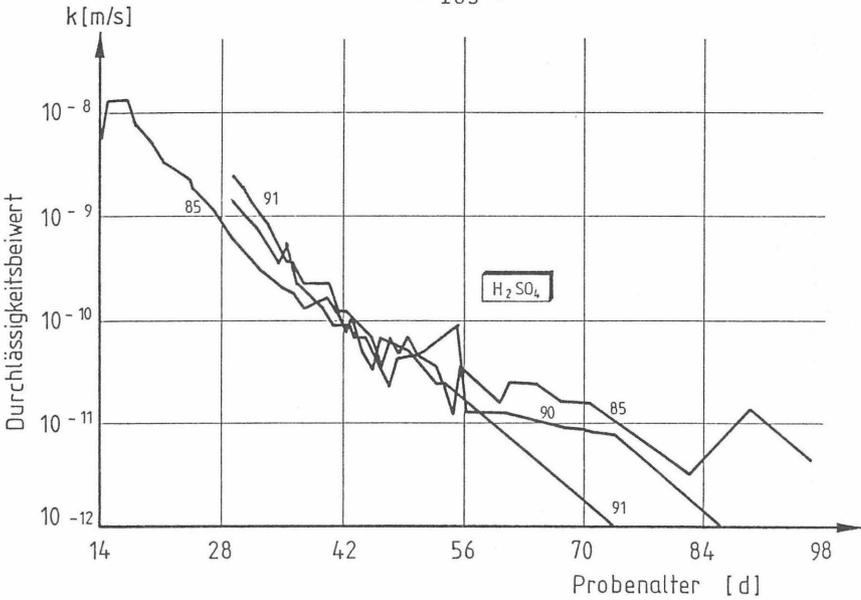


Bild 116: Durchlässigkeitsbeiwerte der mit Schwefelsäure durchströmten Proben

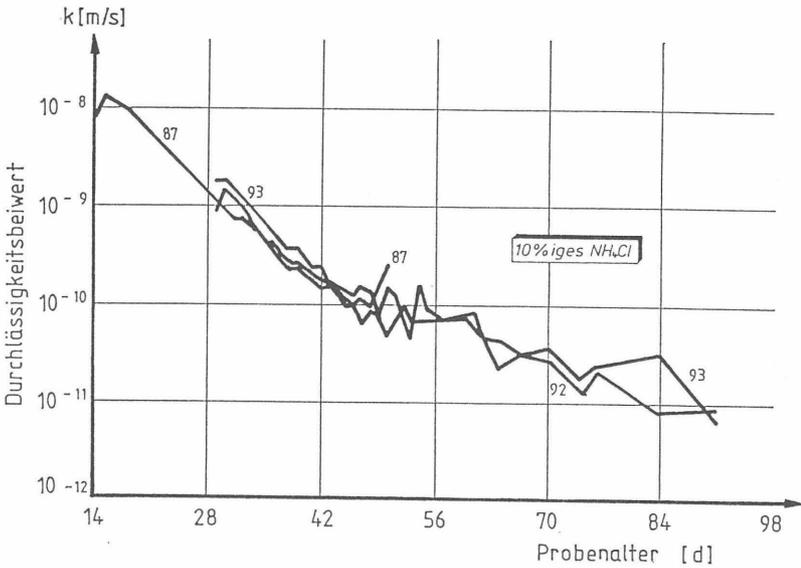


Bild 117: Durchlässigkeitsbeiwerte von mit Ammoniumchloridlösung durchströmten Proben

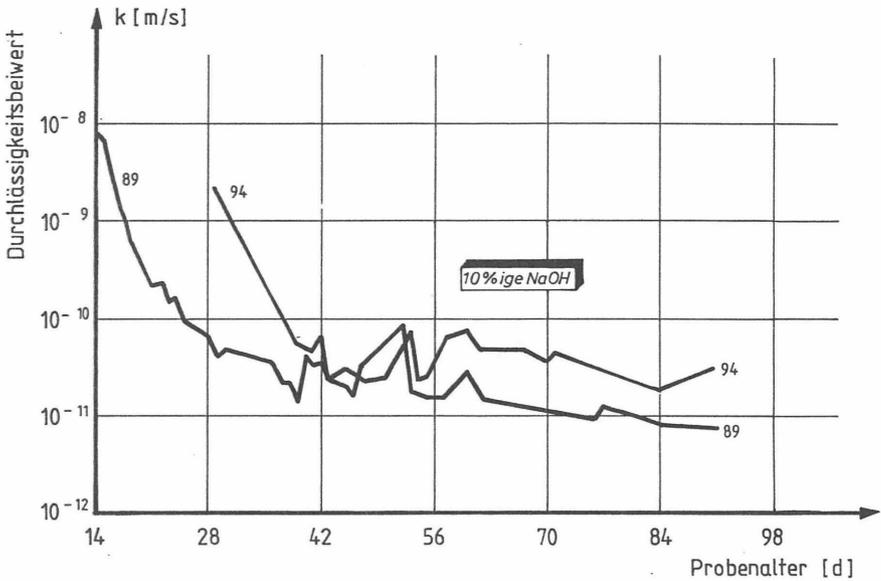


Bild 118: Durchlässigkeitsbeiwerte der mit Natronlauge durchströmten Proben

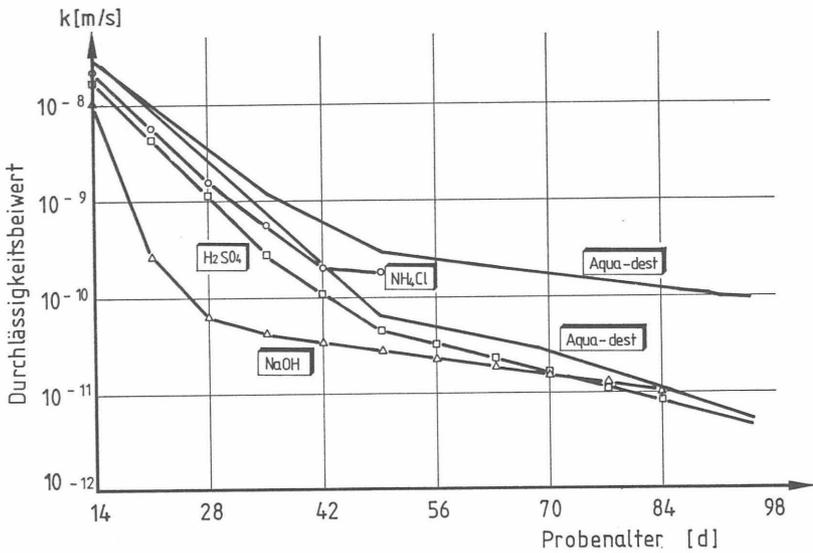


Bild 119: Durchströmungsversuche an im Alter von 14 Tagen in die Prüfzellen eingebaute Proben

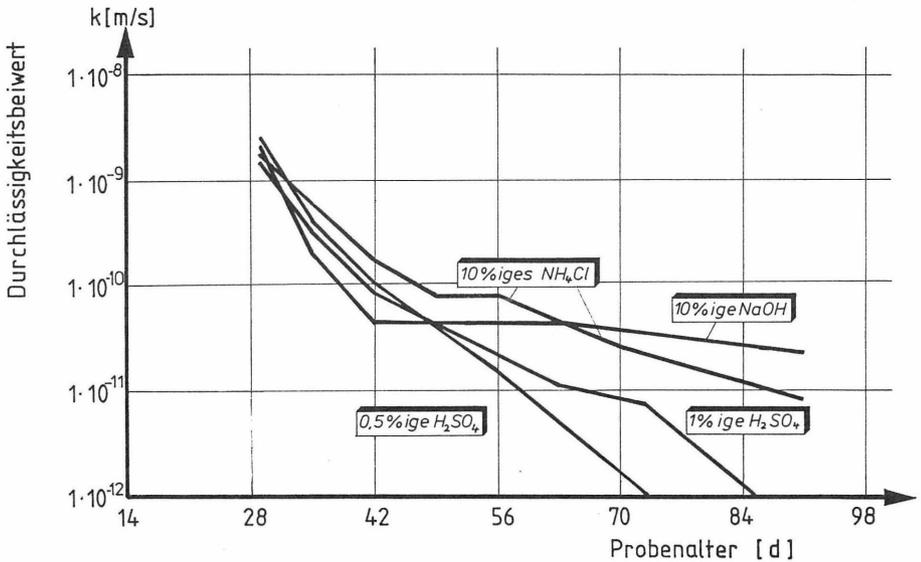


Bild 120: Durchströmungsversuche an im Alter von 28 Tagen in die Prüfzellen eingebauten Proben

Alle untersuchten Proben wiesen k -Werte $< 1 \cdot 10^{-8}$ m/s auf. Diese nahmen über den gesamten Durchströmungszeitraum stark ab und streben offensichtlich nach 35 Tagen Durchströmung einem Grenzwert zu. Obwohl aus der Ermittlung der Korndichte (Abschnitt 8 und 9) abzuleiten war, daß nach 28 Tagen nur ein Hydratationsgrad von 30 % vorlag, ist unter Einwirkung von zementaggressiven Flüssigkeiten die Abnahme der Kapillarität und Durchlässigkeit durch fortschreitende Hydratation gerade in den ersten Wochen besonders stark. Bei der Durchströmung mit Aqua-dest. liegt eine höhere Durchlässigkeit gegenüber den anderen Prüf Flüssigkeiten vor.

Unabhängig vom Prüfbeginn (14 und 28 Tage) ist der k -Wert nur vom Probentalter abhängig. D.h. eine Probe, die bereits im Alter von 14 Tagen eingebaut und bereits 14 Tage durchströmt wurde, hatte annähernd den gleichen k -Wert wie die Probe, die erst im Alter von 28 Tagen eingebaut wurde.

Für die Entwicklung von zeitraffenden Prüfmethode n bedeutet dies, daß das Durchlässigkeitsverhalten von Ca-BZS unabhängig vom Prüfalter geprüft werden kann und nur vom Probenalter abhängt. Nach etwa 35 Tagen $\hat{=}$ 49 Tagen Probenalter nahmen die Durchlässigkeitsbeiwerte unabhängig vom Einbaualter nicht mehr so stark ab wie zu Beginn der Durchströmung.

11.2.1.1 Durchströmung mit Aqua dest.

Zwei Proben wurden bis zu 95 Tagen durchströmt. Beim Ausbau der Proben hatte die Probe 83 mit dem größeren k-Wert ($1 \cdot 10^{-10}$ m/s) eine geringer aufgeweichte Zone auf der Anströmseite als die Probe 82. Die aufgeweichte Zone war durch helle Färbung auf der sonst blauen Probe erkennbar.

In der Probe 82 ist offenbar durch die Feststoffumlagerung von der Anströmseite zur Mitte bzw. Ausströmseite eine Verdichtung erfolgt, die die geringe Durchlässigkeit bewirkte.

Durch die Ausspülungen bzw. das Zusetzen der Proben mit Stoffen aus der Prüfflüssigkeit haben sich die Gewichte der Proben nach der Durchströmung verändert (Bild 121). Die fortschreitende Hydratation führte zu einer Zunahme der Dichten (Abschnitt 9), die von den Ausspülungen überlagert wurde. D.h. eine Messung des Hydratationsgrades an den durchströmten Proben war hier nicht möglich.

Proben Nr.	Prüfflüssigkeit	Einbaualter [d]	Durchströmungsdauer [d]	Einbaugewicht [g]	Ausbaugewicht [g]	Differenz G [g]
78	Aqua dest.	14	14	943,3	932,9	-10,4
79	" "	14	21	996,9	993,2	- 3,7
80	" "	14	28	970,3	966,3	- 4,0
82	" "	14	81	957,6	956,4	- 1,2
83	" "	14	79	973,4	980,4	+ 7,0
84	H ₂ SO ₄ 0,5%	14	14	1205,7	1199,5	- 6,2
85	" "	14	14	1153,6	1151,5	- 6,1
95	H ₂ SO ₄ 1%	21	7	1026,2	1022,8	- 3,8
90	" "	28	67	974,5	977,8	+ 3,3
91	H ₂ SO ₄ 0,5%	28	67	987,4	990,1	+ 2,7
86	NH ₄ Cl	14	14	815,3	805,1	-10,2
92	"	28	68	1019,3	1023,6	+ 4,3
93	"	28	67	1045,9	1047,1	+ 1,2
88	NaOH	14	14	940,6	1001,6	+61,0
89	"	14	14	968,7	1022,9	+54,2
94	"	28	63	1012,3	1038,5	+26,2

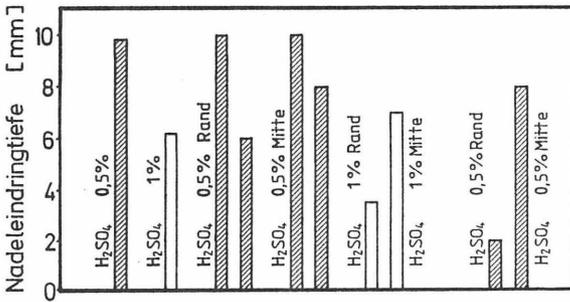
Bild 121: Differenzen der Ein- und Ausbaugewichte der durchströmten Proben (Simons, Schnell, Geil, 1985)

11.2.1.2 Durchströmung mit Schwefelsäure

Die mit Schwefelsäure durchströmten Proben hatten mit zunehmendem Probenalter immer geringere Durchlässigkeiten durch die Bildung von Ettringit, das in den relativ großen Porenraum der Probe "hineinwuchs".

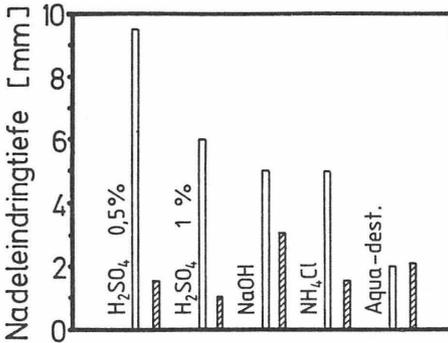
Die im Alter von 14 Tagen in die Prüfwelle eingebaute Probe wies gegenüber der im Alter von 28 Tagen in die Prüfwelle eingebauten Probe eine etwas größere Durchlässigkeit gegen Ende des Versuches auf. Die Nadeleindringtiefen waren an der Anströmseite bei der bereits im Alter von 14 Tagen durchströmten Probe wesentlich größer als die erst im Alter von 28 Tagen durchströmte Probe (Bild 122).

Unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen den mit 0,5 % und 1,0 %iger Schwefelsäure beaufschlagten Proben (Einbualter 28 Tage) konnten nicht eindeutig festgestellt werden. Bei der mit 0,5%iger Schwefelsäure durchströmten Probe sickerte nach dem 30. Tag und bei der mit 1,0 %iger Schwefelsäure ab dem 46. Tag der Durchströmung keine meßbaren Flüssigkeitsmengen mehr durch die Probe. Die Dicke der Korrosionsschicht betrug nach 91-tägiger Versuchsdauer nur wenige mm.



Probenalter

Einbau : 14 Tage	14 Tage	28 Tage
Ausbau: 28 Tage	91 Tage	91 Tage



Probenalter

Einbau : 14 Tage
Ausbau: 28 Tage

Bild 122: Nadeleindringtiefen an Anström- und Ausströmseiten der mit Prüfflüssigkeiten durchströmten Proben

11.2.1.3 Durchströmung mit Ammoniumchlorid

Die mit Ammoniumchlorid beaufschlagte Probe, die im Alter von 14 Tagen in die Prüfzelle eingebaut wurde, hatte eine geringere Durchlässigkeit als die mit Aqua dest. untersuchte Probe.

Trotz Lösung von Calcium und Calciumchlorid verringerte sich der k-Wert stetig. Der Zustand der nach 5 Wochen durchströmten Probe war ähnlich wie der der mit "Aqua dest." durchströmten Proben. Nur an der Anströmseite hatte sich eine dünne braunverfärbte Schicht ausgebildet (Bild 122).

11.2.1.4 Durchströmung mit Natronlauge

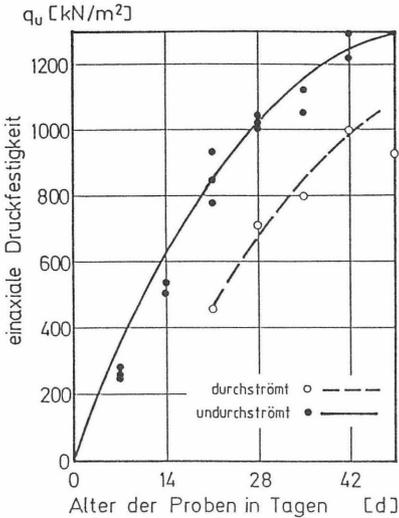
Die Durchlässigkeitsbeiwerte der im Alter von 14 Tagen in die Prüfzelle eingebauten Probe verringerte sich mit zunehmendem Probenalter stark. Die nach 14 Tagen ausgebaute Probe war relativ weich. Der Grund dafür kann die Bildung von Wasserglas sein, das sich durch die Reaktion von NaOH mit der Kieselsäure in der Dichtwandmasse gebildet hat.

Dies ist aber offensichtlich nur im erhärteten Zustand der Fall, da die nach 77 Tagen Durchströmung (Probenalter 91 Tage) ausgebaute Probe wesentlich härter war. Bei der Probe, die 28 Tage nach der Herstellung durchströmt wurde, hat die o.g. Reaktion nicht in so starkem Maße stattgefunden.

11.2.2 Festigkeit durchströmter und undurchströmter Proben

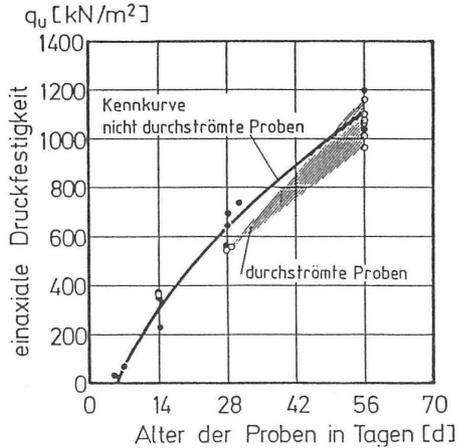
Die Druckfestigkeiten, an undurchströmten und mit Aqua-dest. durchströmten Proben ermittelt, sind in Bild 123 in Abhängigkeit vom Probenalter zusammen mit den Festigkeitswerten un- und durchströmter Na-BZS dargestellt. Die Druckfestigkeiten der nach 7 Tagen mit Aqua-dest durchströmten Proben betragen etwa 65 % der an undurchströmten Proben ermittelten Festigkeiten.

200/175



Ca-BZS

45/150



Na-BZS

Bild 123: Einaxiale Druckfestigkeiten von undurchströmten und durchströmten Proben

Einaxiale Druckversuche an durchströmten Proben aus Na-BZS (45/150) erbrachten ebenfalls einen Festigkeitsabfall gegenüber undurchströmten Probekörpern (Bild 123), der aber nicht so ausgeprägt war.

Es ist anzunehmen, daß der Festigkeitsabfall mit der Ausspülung von Calcium Ca^{2+} zusammenhängt. Wie in Abschnitt 11.2.4 noch näher beschrieben werden wird, nahm die pro Tag ausgespülte Menge an Ca^{2+} bis zum 3. Durchströmungstag stark zu und fiel dann bis zum 5. Tage wieder ab. Dabei blieb die flüssigkeitsbezogene Ausspülrate mit etwa 400 mg/l ab dem 3. Durchströmungstag nahezu konstant. Mit der immer geringer werdenden Durchflußmenge verringerte sich auch die Menge an gelöstem Calcium.

Die von Prüfflüssigkeiten durchströmten Proben waren an der Anströmseite derart stark aufgeweicht, daß ein Druckversuch nicht sinnvoll erschien. Deshalb wurden Nadelversuche an den Anström- und Ausströmseiten der Proben vorgenommen (s. Abschnitt 11.2.1.4).

11.2.3 Ca-Ausspülraten

11.2.3.1 Durchströmung mit Aqua dest.

Der Zusammenhang zwischen Ca^{2+} -Ausspülung und Probenalter, ermittelt an mit Aqua dest. durchströmten Proben, ergab nur geringe Differenzen der einzelnen Versuche.

Die aus den Proben mit Aqua dest. ausgespülten Ca^{2+} -Mengen betragen unabhängig von der Durchströmungszeit in Abhängigkeit von der Durchströmungsmenge ($k = f(t)$) i.M. 38,6 % der theoretisch ausspülbaren Ca^{2+} -Mengen bezogen auf die Löslichkeit des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1.700 g/l bzw. Ca^{2+} 920 mg/l).

Verglichen mit der von Strobl (1982) angegebenen Formel für Na-BZS mit k-Werten um $1 \cdot 10^{-8}$ m/s

$$A = 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot i^{2,1} \quad [-] \quad (\text{Gl.91})$$

ergibt sich aus den vorliegenden Untersuchungen, daß diese für Ca-BZS um das Verhältnis der k-Werte reduziert werden muß:

$$\frac{k_{\text{vorh}}}{1 \cdot 10^{-8}} \quad k_{\text{vorh}} = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s für die untersuchten Ca-BZS}$$

Ferner folgt aus der Gegenüberstellung der Ausspülraten, daß für die o.g. Versuchsbedingungen die Gleichung um den materialabhängigen Faktor r_c reduziert werden muß.

$$A^* = A \cdot \frac{k_{\text{vorh}}}{1 \cdot 10^{-8}} \cdot r_c \quad (\text{Gl. 92})$$

A* = Ca-Ausspülrate bei $i = 60$

Aus den Untersuchungen mit den Na-BZS aus Abschnitt 11.1 lautet der Faktor für Na-BZS $r_c = 0,5$ und aus den o.g. Untersuchungen für Ca-BZS $r_c = 0,29$.

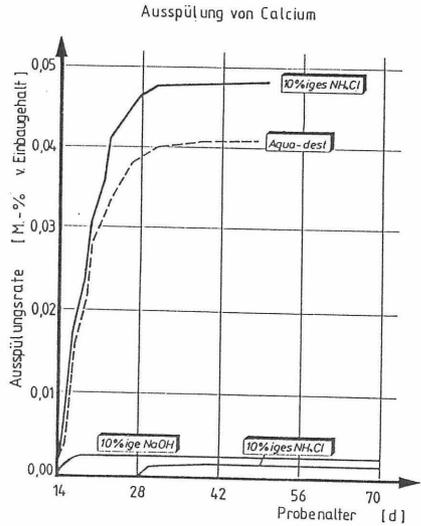
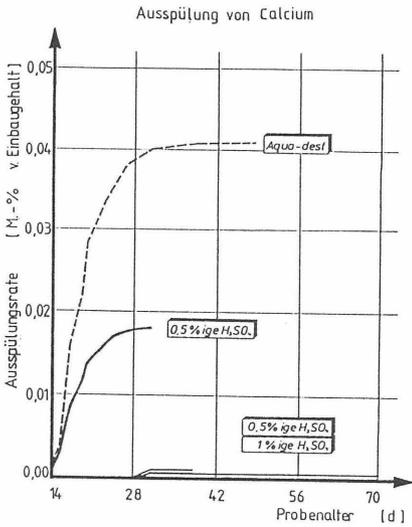
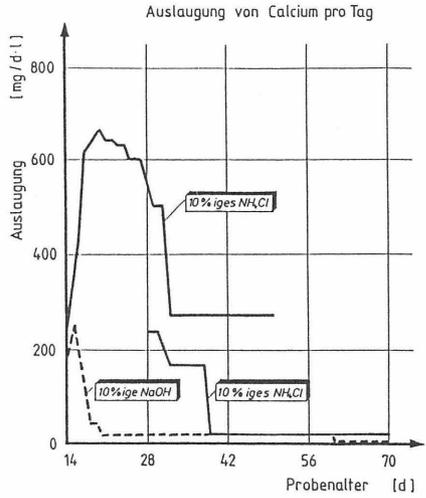
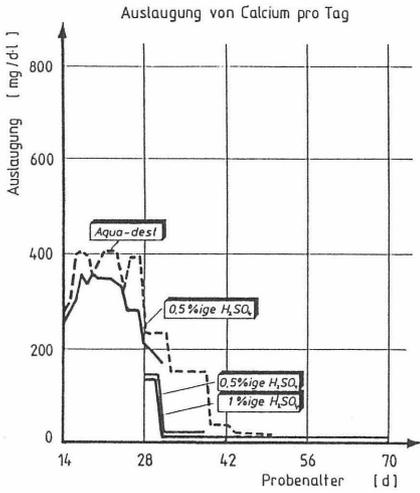
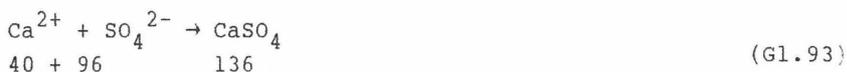


Bild 124: Ca-Ausspülraten der mit Prüf Flüssigkeiten durchströmten Ca-BZS

11.2.3.2 Durchströmung mit Schwefelsäure

Bei den mit Schwefelsäure durchströmten Proben ist neben der Calciumausspülung auch der Sulfat (SO_4^{2-})-Gehalt in der aufgefangenen Flüssigkeit wichtig. An der ausgespülten Sulfatmenge ist zu erkennen, wieviel Prozent der Schwefelsäure mit dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ der Dichtwandmasse in Reaktion getreten sind. Darüber hinaus ist es über stöchiometrische Berechnungen möglich, die von den SO_4^{2-} -Anionen gebundene Kalkmenge zu bestimmen. Nach folgender stöchiometrischen Beziehung binden 1 mg Sulfat (SO_4^{2-}) 0,42 mg Ca^{2+}



Aus der Massendifferenz der in die Probe eingedrungenen SO_4^{2-} und der ausgespülten SO_4^{2-} Anionen läßt sich die Masse der Ca^{2+} -Kationen errechnen, die an einer Reaktion teilgenommen haben. Zusammen mit der ausgespülten Menge an Ca^{2+} -Ionen erhält man dann die Gesamtmenge des von der Schwefelsäure gelösten und gebundenen Kalks. Aus der Bilanz des Gesamtverlustes an Calcium ergibt sich eine geringere Ca-Ausspülrate als bei Aqua-dest., wobei diese Konzentrationen bei 0,5 %iger Schwefelsäure etwa halb so groß sind wie bei der 1 %igen Schwefelsäure.

11.2.3.3 Durchströmung mit Ammoniumchlorid

Die Analyse der aufgefangenen Flüssigkeit an der Probe Nr. 86 ergab:

Durchflußmenge	NH_4^+	Ca^{2+}	Cl^-
Q [ml]	[mg]	[mg]	[mg]
5635	475,2	3557	4083,5

Wird die Durchflußmenge Q der in die Probe eingeströmten Menge gleichgesetzt, so flossen

$$5,635 \text{ l} \times 300 \text{ mg/l} = 1690,5 \text{ mg NH}_4^+ \quad (\text{Gl.94})$$

und

$$5,635 \text{ l} \times 583 \text{ mg/l} = 3285,2 \text{ mg Cl}^- \quad (\text{Gl.95})$$

in die Probe ein.

Das Ca(OH)_2 in der Probe wird durch NH_4Cl in der Form



gelöst. Die in der ausgeströmten Wassermenge analysierten 1557 mg Ca^{2+} entsprechen einer Ca^{2+} Konzentration von 631 mg/l. Umgerechnet auf Ca(OH)_2 entspricht dies 1,076 g/l. Da Ca(OH)_2 eine Löslichkeit von 1,700 g/l hat, kann man davon ausgehen, daß das Calciumhydroxid vollständig dissoziiert vorliegt.

Die 475,2 mg NH_4^+ -Ionen binden 937,2 mg Cl^- . Die Differenz zwischen den 4084 mg ausgespülten Cl^- und dem am NH_4^+ gebundenen Cl^- ergibt die Menge 3111 mg Cl^- , die mit Ca^{2+} reagieren können. 3111 mg Cl^- können entsprechend dem Massenverhältnis 1735 mg Ca^{2+} binden. Die insgesamt ausgespülten 3557 mg entsprechen nun der 2-fachen Menge der im CaCl_2 möglichen Menge Ca^{2+} . Die analoge Berechnung bei Probe 87 ergibt nach 36 Tagen Durchströmung die im CaCl_2 gebundene Menge von 999 mg Ca^{2+} . Die ausgespülte Ca^{2+} -Menge ist mit 1840 mg etwa halb so groß wie bei Probe 86. Es zeigt sich, daß mit zunehmender Versuchsdauer immer weniger Ca(OH)_2 herausgespült wurde, da mit fortschreitender Hydratation das zunächst in großer Menge vorhandene Ca(OH)_2 durch die HOS abgebaut wird.

11.2.3.4 Durchströmung mit Natronlauge

Die Proben 88, 89 und 94 haben während der 28- und 67-tägigen Versuchsdauer eine Dichteerhöhung erfahren (Bild 121). Sie wurden in den betrachteten Zeiträumen insgesamt von 845 ml 10 %iger Natronlauge durchströmt. Dies entspricht Massen von 33,8 g NaOH. Es müssen also neben den 19,44 g Na^+ zusätzlich 12,4 g Wassermoleküle in die Probe eingebaut worden sein. Die Ausspülraten an Ca^{2+} sind mit 0,003 für Probe 88 und 0,002 für Probe 89 sehr gering, während bei der Probe 94, die erst im Alter von 28 Tagen durchströmt wurde, die Ausspülrate Null war.

Die 10 %ige Natronlauge hat einen pH-Wert von 14 und eine extrem hohe Leitfähigkeit (gegen ∞). Die gemessenen Werte an der durchströmten Flüssigkeit waren sehr gering und stiegen mit zunehmender Versuchsdauer an, obwohl die Menge an Ca^+ -Ionen immer geringer wurde. Somit ist NaOH in der durchströmten Flüssigkeit vorhanden und wird mit längerer Versuchsdauer wieder herausgespült.

Natronlauge ist nicht zementschädigend, bildet aber mit amorpher Kieselsäure hydratisiertes Wasserglas. Die nach 14-tägiger Durchströmung im Alter von 28 Tagen ausgebaute Probe 88 sah schuppenartig aus, während die anderen Proben ebenso wie die Probe 89 nach 91 Tagen Durchströmung homogen waren.

11.2.4 Nadeleindringversuche

Um ein qualitatives Festigkeitsmaß an An- und Ausströmseite sowie Hinweise über das Ausmaß von Korrosionsschichten zu erhalten, wurden Nadelversuche (Bild 122) durchgeführt. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, daß die Schwefelsäure die Ca-BZS am stärksten angreift. Bei den 14 Tage durchströmten Proben (Ausbaualter 28 Tage) war die Nadeleindringtiefe an der Anströmseite fast doppelt so groß wie bei den mit anderen Prüf Flüssigkeiten durchströmten Proben, wobei die Aqua dest.-durchströmten Proben die geringsten Eindringtiefen hatten. Der Zustand der bis zum 91. bzw. 95. Tag

durchströmten Proben war wegen der geringen Durchlässigkeit nahezu gleich. Die erst im Alter von 28 Tagen beaufschlagten Proben haben erwartungsgemäß geringere Eindringtiefen.

Die sonst blaugrauen Proben färbten sich an den Anströmseiten bei den mit Schwefelsäure durchströmten Proben weiß und bei den mit Ammonium-Chlorid-Lösung durchströmten Proben braun. Zwischen den gemessenen Korrosionstiefen (Nadeleindringung), dem beschriebenen Durchlässigkeitsverhalten und den Ausspülraten besteht aber kein direkter Zusammenhang.

11.2.5 Beurteilung

Bei Langzeituntersuchungen an ausgehärteten Ca-BZS (Bentonit M, Zement HOZ 35L (HOS 72 M.-%)) mit Aqua dest. und 5 %iger Natronlauge wurden k-Werte im Bereich von $1 \cdot 10^{-10}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-12}$ m/s gemessen (Simons, Hänsel, Reuter, 1985). Diese Mischung 200/200 hat gegenüber der erhärtenden Ca-BZS eine geringere Porenzahl und nach Bild 103 (Abschnitt 9) auch geringere Wasserdurchlässigkeiten. Aus den Ergebnissen der Langzeituntersuchung an den ausgehärteten Proben (Bild 125) ist im Vergleich zu den zeitraffenden Prüfungen an den erhärtenden Proben der Mischung 200/175 mit Bentonit E folgendes feststellbar:

- Die zeitabhängige Entwicklung der k-Werte ist annähernd gleich.
- Die k-Werte bei Durchströmung mit den Prüfflüssigkeiten (Lauge, Aqua dest. und Säuren) verhalten sich untereinander ähnlich.
- Die dichtende Wirkung von Aqua-dest. (Abschnitt 11.1) ist auch bei den ausgehärteten Proben erkennbar. Die Säuren haben durch die Bildung von z.B. Ettringit eine Dichtwirkung hervorgerufen, die durch den stetig abfallenden k-Wert bis vergleichbare 90 Tage nach Versuchsbeginn deutlich wird (Bild 116 und 125).

Unter Berücksichtigung der erzielbaren k-Werte zum Schluß der Versuche ergeben die zeitraffenden Prüfmethode Durchflußmengen von

$$Q = k \cdot i \cdot F_A \quad (Gl.97)$$

$$Q_1 = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 60 \cdot F_A \text{ m}^3 \quad \text{zeitraffende Versuche} \quad (Gl.98)$$

$$Q_1 = 6 \cdot 10^{-10} \cdot F_A \text{ m}^3 \quad \text{an erhärtenden Proben}$$

$$Q_2 = 1 \cdot 10^{-12} \cdot 150 \cdot F_A \text{ m}^3 \quad \text{Langzeitversuche} \quad (Gl.99)$$

$$Q_2 = 1,5 \cdot 10^{-10} F_A \text{ [m}^3 \text{]} \quad \text{an ausgehärteten Proben}$$

Mit der zeitraffenden Prüfmethode kann man die Beständigkeit und das Korrosionsverhalten prüfen, wenn der gewählte hydraulische Gradient ≤ 60 ist. Die Versuche liegen auf der sicheren Seite, da die durchströmende Flüssigkeitsmenge etwas höher ist und somit auch etwas höhere Ausspülraten vorliegen.

Daß im Gegensatz zu den Na-BZS hier eine stabile Mischung vorlag, hängt auch mit dem Ionenaustauschvermögen des Bentonits (Abschnitt 5) und seiner Zementstabilität (Abschnitt 7) zusammen. Ferner sind Ca-BZS wesentlich früher ausgehärtet, während Na-BZS mit annähernd gleichem Porenvolumen (Bilder 100 und 104) später ausgehärtet sind. Na-BZS sind bei einem geringen hydraulischen Gefälle bzw. einem späteren Probenalter gegen aggressive Medien beständig (Abschnitt 2 und 4).

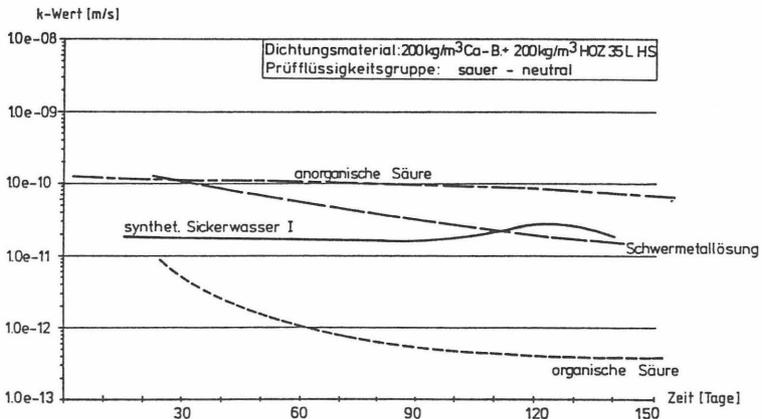
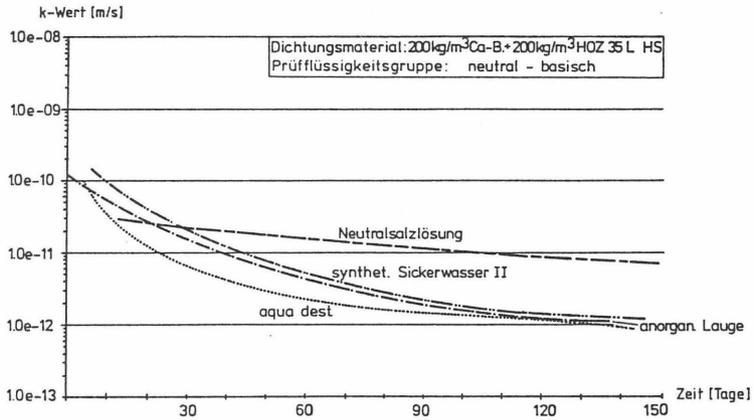


Bild 125: Ergebnisse aus Durchlässigkeitsuntersuchungen an ausgehärteten Ca-BZS

12. Zusammenfassung

Bislang wurden bei der Planung und Herstellung von Dichtwänden mit Bentonit-Zement-Suspensionen (BZS) für den jeweiligen Anwendungsfall unterschiedliche Mischungen entwickelt, ohne daß in den meisten Fällen die Wechselwirkung von Bentonit und Zement berücksichtigt wurde. Es lagen noch keine systematischen Untersuchungen vor, inwieweit Zusammensetzung, physikalische und chemische Eigenschaften der verwendeten Suspensionen auf die spätere Qualität der Wand übertragen werden können.

Erarbeitet wurde anhand der vorliegenden Untersuchungen und Baustellenerfahrungen ein Untersuchungsschema zur Herstellung und Prüfung von BZS unter Nennung der Anforderungen und Eigenschaften einsetzbarer Materialien. Das Untersuchungsschema enthält Auswahlkriterien für zementstabile Bentonite. Aus den Baustellenergebnissen und der Beschreibung physikalischer und chemischer Eigenschaften von Bentonit und Zement sowie ihrer Wechselwirkung in der frischen und erhärteten Suspension wurde ein Untersuchungsprogramm für die Herstellung und Prüfung von BZS in Abhängigkeit von folgenden Parametern aufgestellt:

Quellzeit
zeitabhängige Filtratwasserabgabe
zeitabhängige Viskosität.

Der Einfluß der zeitabhängigen Filtratwasserabgabe auf die Suspensionsverluste wurde auf Baustellen und in laborbegleitende Untersuchungen geprüft. In Abhängigkeit von

Bentonitsorte
Bentonitkonzentration
Zementsorte
Zementkonzentrationen

wurden für Viskosität, Filtratwasserabgabe und Fließgrenzen Kennkurven entwickelt. Mit diesen Kennkurven ist es möglich, das Verhalten der Na-BZS und Ca-BZS in unbewegtem und bewegtem Zustand abzuschätzen bzw. für die Verarbeitung das jeweilige Mischungsverhältnis auszuwählen.

Dabei wurden insbesondere die Unterschiede der Bentonite untereinander und der Hochofenschlackenanteil im Zement als wichtige Parameter erkannt. Für die Beurteilung von BZS im frischen Zustand ist es erforderlich, die zeitliche Entwicklung unbewegter und bewegter BZS zu erfassen. Die Na-Bentonite sind vor allem durch Zementstabilität und Ionenaustauschvermögen zu unterscheiden. Ein zementstabiler Na-Bentonit mit geringem Ionenaustauschvermögen und ein Ca-Bentonit mit geringer Filtratwasserabgaben führten zu günstigeren Durchlässigkeitsbeiwerten in Verbindung mit einem Zement HOZ 35L (65 M.-% Hochofenschlacke).

Das Erstarrungsverhalten führte zu Rückschlüssen auf das Verhalten im frischen Zustand. Aus den Untersuchungsergebnissen von erhärteten BZS und erhärtenden BZS wurden Kennwerte ermittelt, die den Hydratationsgrad erfassen. Die Beurteilung des Wasserbindevermögens von Bentonit und Zement in BZS bringt einen reduzierten Wasser/Zement-Faktor. Mit der Untersuchung des für die Durchströmung vorhandenen Porenraumes konnten die Wasserdurchlässigkeit und ihre zeitliche Entwicklung erfaßt und für die Beurteilung der anschließenden Beständigkeitsversuche herangezogen werden.

Bei den Durchlässigkeitsversuchen wurden der Einfluß der Prüfflüssigkeiten auf die Durchlässigkeitsbeiwerte beschrieben und zeitraffende Prüfmethode zur Untersuchung der Beständigkeit vorgestellt.

Es stellte sich heraus, daß

- Aqua dest. eine Dichtwirkung hervorruft, die unterhalb der Wasserdurchlässigkeit erhärtender und ausgehärteter BZS liegt,
- zeitraffende Prüfmethode bei erhärtenden Na-BZS (Probenalter 14 bzw. 28 Tage) durch Wahl eines hydraulischen Gradienten $i = 60$ zu unbefriedigenden Ergebnissen führen,
- zeitraffende Prüfmethode bei Ca-BZS im obengenannten Probenalter möglich und mit Ergebnissen aus Langzeituntersuchungen an ausgehärteten Proben vergleichbar sind,
- die Ca-Ausspülraten u.a. vom lösenden bzw. dichtenden Verhalten der Prüf Flüssigkeiten abhängen, aber insgesamt geringer als in der Literatur angegeben sind.

Literaturverzeichnis

- Blinde, A.; : Untersuchungen vertikaler Dichtwände an
Blinde, J.; zwei Dichtwand-Großversuchskästen auf der
Kienzle, G. Deponie Dreieich-Buchsschlag, Mitteilungen
zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie,
Heft 24, RWTH Aachen, 1986, S. 185 - 204
- Blinde, J.; : Untersuchung der Langzeitbeständigkeit
Kienzle, G. von Einphasendichtwänden, VDI-Berichte
N. 628, 1987, S. 341-384
- Braune, H.; : Zur Thixotropie von Bentonitsuspensionen,
Richter, I. Kolloid-Zeitschrift 113, Bd. 1, 1949
S. 20-29
- Brauns, K.-J.; : Zur Stabilität von Schmalwandsuspensionen
Witt, J. im durchströmten körnigen Untergrund,
Wasserwirtschaft, H. 12, 1983
- Camefort, H. : Bodeninjektionstechnik, Bauverlag, 1969
- Carl, L.; Strobl, T. : Dichtungswände aus einer Zement-Bentonit-
Suspension. Wasserwirtschaft 66 (1976),
H. 9, S. 246-252
- Caron, C. : Un nouveau style de perforation la boue
autodurcissable. Annales de l'institut
Technique du Batiment et des Travaux
public, 1972, Materiaux No. 47, 39 Seiten
- Caron, C. : Perennite des systemes argilecement ou
bentonitecement Extrait des construction,
1972, S. 291-296

- Czernin, W. : Zementchemie für Bauingenieure,
Bauverlag Wiesbaden, 1977
- Döscher, H.D. : Die Suspensionswand. Mitteilungsblatt der
Bundesanstalt für Wasserbau, 1977, H. 41,
S. 11-21
- Düllmann, H.; : Erfahrungen mit Dichtungswänden für Müll-
Heitfeld, K.-H.; deponien und Baugruben. 2. Nationale
Krapp, L. Tagung für Ingenieurgeologie, Fellbach
1979, Deutsche Gesellschaft für Erd- und
Grundbau, S. 271-281
- Düllmann, H.; : Erosionsbeständigkeit von Dichtwänden
Heitfeld, K.-H. unterschiedlicher Zusammensetzung,
Vorträge auf der Baugrundtagung,
Braunschweig, 1982
- Frank : Ausführung von Dichtungsschlitzwänden,
Mitteilung des Lehrstuhls für Grundbau
und Bodenmechanik, TU Braunschweig,
H. 8, 1982, S. 95 - 111
- Freundlich, H.; : Über die Thixotropie von Bentonit-
Schmidt, O.; Suspensionen, Kolloid-Beihefte 36, Bd. 1,
Lindau, G. S. 43-81
- Gabener, H.-G. : Untersuchungen über die Anfangsgradienten
und Filtergesetze bei bindigen Böden,
Dissertation, Essen, 1983
- Geil, M. : Eigenschaften und Prüfung von Dichtwand-
massen, Dichtungswänden und -sohlen,
Mitteilungen des Lehrstuhls für Grundbau
und Bodenmechanik, TU Braunschweig,
H. 8, 1982, S. 113 - 144

- Geil, M. : Untersuchung der Dauerhaftigkeit mineralischer Abdichtungen für die Sanierung von Altlasten, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, H. 13, 1984, S. 127 - 140
- Gregor, H.P. : A general thermodynamic theory of ion interchange processes, Journal of the American Chemical Society, 1948, H. 70, S. 1293,
- Hofmann, U. : Über das Sedimentvolumen und die Quellung von Bentonit, Kolloid-Zeitschrift, 110. Band, H. 1, 1945
- Hofmann, U. : Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Thixotropie, insbesondere bei tonhaltigen Gelen, Kolloid-Zeitschrift 125, Bd. 2, 1952, S. 86-99,
- Hofmann, U. : Aus der Chemie der hochquellfähigen Tone (Bentonite), Angewandte Chemie, 68, Bd. 1, 1956 S. 53-61,
- Jefferies, S.A. : Bentonite-Cement-Slurries for hydraulic cutoffs, proceedings of the 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Stockholm, 1981, S. 435-440
- Jessberger, H.L. : Qualitätssicherung beim Einbau von mineralischen Deponieabdichtungen. Tagung Fortschritte der Deponietechnik, Haus der Technik, Essen, 1985

- Jessberger, H.L. : Empfehlungen des AK 11 "Geotechnik der Alt-Deponien und Altlasten" der DGEG, Bochum/Essen 1986, Bautechnik, H. 9, 1986
- Jessberger, H.L. : Abdichtungs- und Sanierungstechniken zum Schutz von Boden und Wasser, - Deponien und Altlasten VDI-Berichte N. 628, 1987, S. 243-299
- Krenkler, K. : Chemie des Bauwesens, Bd. 1, Anorganische Chemie, Sprinkler Verlag 1980
- Lottermoser, A. : Kurze Einführung in die Kolloidchemie, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1948
- Meseck, H. : Technologie der Dichtwandmassen, Beton-Information, Beton-Verlag, Heft 2/3, 1981
- Meseck, H.;
Ruppert, F.-R.;
Simons, H. : Herstellung von Dichtungsschlitzwänden im Einphasenverfahren, Tiefbau, 1979, H. 8, S. 601 - 605
- Möbius, C.H. : Bentonit-Suspensionen - Eigenschaften, Herstellung und Prüfung. Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 1976
- Möbius, C.H. : Einfluß von Zusätzen auf die Eigenschaften von Bentonitsuspensionen, Die Bautechnik, 1976, H. 2, S. 47 - 55
- Nato/CCMS : Pilotstudie kontaminierter Standorte, Projekt C: Abdeckungs- und Barrierensysteme. G.D.R. Parry und R.M. Bell, 1983, Unterlagen des Umweltbundesamtes

- Neff, H.;
Walter, H. : Bodenmechanische und chemische Untersuchungen an der Zement-Bentonit-Schlitzwand zum Grundwasserschutz bei der Großdeponie Dreieich-Buchsschlag der Stadt Frankfurt/Main - Vortrag Fachtagung Deponietechnik der Südchemie AG, Hamburg, 1983
- Portier, J.-L. : Le comportement reel des bentonite-ciment nouvelles applications, Bureau Securitas, Übersetzung: Das wirkliche Verhalten von Bentonit-Zement-Schlämmen, Neuere Anwendungsmöglichkeiten, Annalen des Technischen Institutes für Bauwesen und Öffentliche Arbeiten, Serie: Böden und Gründungen 986, N. 423, 1994
- Reuter, E. : Beständigkeit von mineralischen Dichtungen gegenüber anorganischen und organischen Lösungen - Empfehlungen zur Prüfung für mineralische Deponieabdichtungen, in: Fehlau/Stief (Hrsg.). Fortschritte der Deponietechnik 1985, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 15, Erich Schmidt Verlag GmbH, Berlin, 1986
- Rostasy, F.S. : Vorlesungsumdrucke des Lehrstuhls für Baustoffkunde und Stahlbetonbau, TU Braunschweig, 1981
- Ruppert, F.-R. : Bentonitsuspension für die Schlitzwandherstellung, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 22 (1980), S. 684 - 686
- Ruppert, F.-R.;
Karstedt, J. : Standsicherheitsprobleme bei der Schlitzwandbauweise, Baumaschine und Bautechnik, 1980, H. 5

- Schirmer, H. : Sanierung und Erweiterung einer Abfalldeponie durch eine umschließende Dichtungsschlitzwand, Wasser und Boden, 1980, H. 11, S. 507 - 510
- Schulze; Muhs : Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, Springe-Verlag, 1967
- Simons, H. : Schlitzwände, Umdruck für Vertiefer, Kapitel U, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1980
- Simons, H.;
Schnell, W.;
Geil, M. : Dauerhaftigkeit mineralischer Abdichtungen aus Zement-Ton-Mischungen gegen Wasser als Ionenträger. Abschlußbericht von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Vorhaben, 1985
- Simons, H.;
Hänsel, W.;
Geil, M. : Tonige Stoffe zur Dichtung neuer und Sanierung alter Deponien. Vorträge auf der Baugrundtagung 1982 in Braunschweig, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, S. 279 - 316
- Simons, H.;
Hänsel, W.;
Meseck, H. : Beständigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton gegen Sickerwässer. Vortrag auf dem ISWA-Symposium im Rahmen der IFAT, München, 1981
- Simons, H.;
Ruppert, F.-R. : Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonit-Suspensionen auf Baustellen, Mitteilung des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, H. 9, 1982

- Stief, K. : Nato/CCMS-Pilotstudie kontaminierter Standorte, Kapitel 2, Langzeitwirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen, Entwurf, Juli 1983
- Strobl, T. : Ein Beitrag zur Erosionssicherheit von Einphasendichtungswänden, Wasserwirtschaft, Heft 7/8, 1982
- Uderzo, A. : Le grand fosse, Les Editions Albert Rene, Paris, 1981
- Uhlein, E. : Römpps chemisches Wörterbuch, Deutscher Taschenbuchverlag, München, 1974
- Weiß, F. : Baustoffe für Vertikalabdichtungen, insbesondere für Dichtungsschlitzwände, Vortrag auf dem Seminar "Abdichten statt Absenken", 1981, Technische Akademie Esslingen

Vorschriften:

- DIN 1080 : Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen, Teil 6, 1980
- DIN 1164 : Portland-, Eisenportland, Hochofen- und Traßzement, 1978
- DIN 4030 : Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase, 1969
- DIN 4126 : Ortbeton-Schlitzwände, Konstruktion und Ausführung, 1984
- DIN 4127 : Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten, 1984
- DIN 18 121 : Wassergehalt, 1976
- DIN 18 125 : Bestimmung der Dichte des Bodens, 1972
- DIN 18 130 : Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, 1983
- DIN 18 131 : Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit, 1973



INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik
der TU Braunschweig (Stand September 1988)

- Nr. 76-1 Scheffler, E. : Die abgesteifte Baugrube berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976
- Nr. 78-2 Frank, H. * : Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978
- Nr. 79-3 Schnell, W. : Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979
- Nr. 80-4 Ruppert, F.-R. : Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980
- Nr. 81-1 Schuppener, B. * : Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastung auf Offshore-Bauwerke, 1981
- Nr. 6 Wolff, F. : Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981
- Nr. 7 Bätcke, W. : Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982
- Nr. 8 Meseck, H. *
Schnell, W. : Dichtungswände und -sohlen, 1982
- Nr. 9 Simons, H. *
Ruppert, F.-R. : Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen auf Baustellen, 1982
- Nr. 10 Beckmann, U. : Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982
- Nr. 11 Papakyriakopoulos, P. : Verhalten von Erd- und Steinschüttdämmen unter Erdbeben, 1983
- Nr. 12 Sondermann, W. : Spannungen und Verformungen bei Bewehrter Erde, 1983
- Nr. 13 Meseck, H. : Sonderheft zum 10-jährigen Bestehen des Institutes, 1984
- Nr. 14 Raabe, W. : Spannungs-Verformungsverhalten überkonsolidierter Tone und dessen Abhängigkeit von ingenieurgeologischen Merkmalen, 1984
- Nr. 15 Früchtenicht, H. : Zum Verhalten nichtbindigen Bodens bei Baugruben mit Schlitzwänden, 1984



INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK

- Nr. 16 Knüpfer, J. : Schildvortrieb bei flüssigkeitsgestützter
Meseck, H. Ortsbrust, 1984
- Nr. 17 * : Ablagerung umweltbelastender Stoffe
Fachseminar 06.-07. Februar 1985,
Braunschweig
- Nr. 18* Simons, H. : Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln
Reuter, E. zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus
Ton zum Schutz des Grundwassers, 1985
- Nr. 19 Meseck, H. : Dynamische Pfahltests
Fachseminar 23.-24. November 1985
- Nr. 20* Meseck, H. : Abdichten von Deponien, Altlasten und
kontaminierten Standorten
Fachseminar 06.-07. November 1985
- Nr. 21 Balthaus, H. : Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von
Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethoden, 1986
- Nr. 22 Kayser, R. : Untersuchungen zur Deponierung von
Meseck, H. Braunkohlenaschen, 1986
Rösch, A.
Hermanns, R
- Nr. 23 Meseck, H. : Dichtwände und Dichtsohlen
Fachseminar 02. - 03. Juni 1987
- Nr. 24 Krause, Th. : Schildvortrieb mit erd- und flüssig-
keitsgestützter Ortsbrust, 1987
- Nr. 25 Meseck, H. : Mechanische Eigenschaften von
mineralischen Dichtwandmassen, 1987
- Nr. 26 Reuter, E. : Durchlässigkeitsverhalten von Tonen
gegenüber organischen und anorganischen
Säuren, 1988
- Nr. 27 Wichert, H.-W. : Der Einfluß der Alterung auf die Trag-
fähigkeit historischer Spick-Pfahl-
Gründungen, 1988
- Nr. 28 Geil, M. : Untersuchungen der physikalischen
und chemischen Eigenschaften von
Bentonit-Zement-Suspensionen im
frischen und erhärteten Zustand, 1989