

# Beständigkeit von Dichtwandmassen für die Altlasteneinkapselung gegen kalklösende Kohlensäure

R. Wienberg, R. Khorasani

## 1. Einleitung

Zwei Gründe legten es nahe, die Beständigkeit von hydraulisch gebundenen Dichtwand-Baustoffen für die Einkapselung von Altlasten gegen kalklösende Kohlensäure im Grundwasser zu prüfen:

- Kalklösende Kohlensäure ist als Ergebnis biochemischer Abbauprozesse im Grundwasser im besonderen Maße bei organisch kontaminierten Böden und Altlasten anzutreffen.
- Der Angriff von Kohlensäure kann als typischer lösender Angriff durch eine Säure angesehen werden, der vor allem auf das Kalziumhydroxid und die kalziumhaltigen Komponenten der Bindemittel gerichtet. Insofern ergeben Versuche zum Angriff kalklösender Kohlensäure auch generell qualitative Hinweise zur Säurebeständigkeit der Massen.

Kohlendioxid ist im Wasser gut löslich und hydrolysiert zu Kohlensäure,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , welche wiederum je nach pH und Kohlendioxidkonzentration zu  $\text{HCO}_3^-$  oder  $\text{CO}_3^{2-}$  und Protonen dissoziiert. Die Kohlensäure kann ihrerseits mit dem Kalziumhydroxid unter Bildung von Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) reagieren, welches sich mit weiterem  $\text{H}_2\text{CO}_3$  zu gut wasserlöslichem Kalziumhydrogenkarbonat,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , umsetzt. Durch die Karbonatisierung und insbesondere durch die Herauslösung des Hydrogenkarbonats kommt es zu einer Entfestigung des Zementsteins unter Zurückbleiben von Silikatgel; auf diese Weise wirkt Kohlensäure lösend auf den Zement.

Zwischen Kohlendioxid, Kohlensäure und Hydrogenkarbonat stellt sich im Grundwasser ein Gleichgewicht ein; erst wenn mehr Kohlensäure vorhanden ist, als zur Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichts erforderlich ist, kann zusätzliches Hydrogenkarbonat gebildet und gelöst werden. Diesen überschüssigen Kohlensäureanteil bezeich-

net man als kalklösende Kohlensäure. Zu seiner Bestimmung dient der in der DIN 4030 vorgeschriebene Kalklöseversuch mit Marmorpulver nach Heyer. Die DIN 4030 legt als Grenzwert, über den hinaus bei Beton mit sehr starkem Angriff zu rechnen ist, auf Grund von Erfahrungswerten 100 mg/l fest.

Zur Beständigkeit von mineralischen Bindemitteln gegen kalklösende Kohlensäure führten Locher und Sprung [1] Versuche mit Prismen aus Mörteln mit Portlandzement, Hochofenzement, Traßzement und Traßhochofenzement durch. Die Prismen wurden bis zu 11 Jahre unter Wasser bei ständiger  $\text{CO}_2$ -Zufuhr gelagert. Der Gehalt an kalklösender Kohlensäure betrug ca. 100 mg/l. Es zeigte sich in allen Fällen ein deutlicher lösender Angriff mit Oberflächenabtrag; insgesamt war dieser jedoch relativ gering. Am geringsten war er mit ca. 1 - 2,3 mm bei niedrigen Wasser/Zementwerten ( $W/Z = 0,5$ ) und bei Zementgehalten von  $375 \text{ kg/m}^3$ ; bei weniger dichtem Mörtel ( $W/Z = 0,7$ ) betrug die Abtragung während der 11 Jahre 1,5 bis 3,5 mm. Grube und Rechenberg [2] untersuchten den Betonabtrag bei der Entfestigung durch kalklösende Kohlensäure; dabei bleibt ein weiches Silikatgel zurück, welches als Schutzschicht die Nachlieferung von  $\text{CO}_2$  in den Mörtel hinein stark behindert. Ein Mörtel mit einem  $W/Z$  von 0,5 und einem Portlandzementanteil von  $500 \text{ kg/m}^3$  würde innerhalb von 20 Jahren bei Beanspruchung mit ca. 100 bis 200 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  einen Abtrag von 7,9 mm erleiden.

Ein indirekter Schluß auf die Auswirkung von kalklösender Kohlensäure auf eine Natriumbentonit/Zement-Dichtwandmasse konnte von Schweer und Wienberg [3] gezogen werden. Untersucht wurde Probenmaterial, welches mehr als 10 Jahre in jeweils einen Brunnen innerhalb und außerhalb einer Deponieumschließung mit einer Dichtwand gelagert war. Das innerhalb gelagerte Material war vollständig durchkarbonatisiert; das pH des Materials lag in Übereinstimmung damit bei 8,5, während dasjenige des außerhalb der Einschließung gelagerten Materials bei 10,9 und somit noch im Bereich zementgebundener Massen lag. Die elektronenoptische Untersuchung ergab für die Probe außerhalb der Dichtwand das typische Bild zementgebundene Dichtwandmassen mit wolkenförmig ausgebildeten Tonplättchen und nadeligen und säulenförmigen Zementphasen, die sich ineinander vernetzen und mit den Tonteilchen ein starres Gefüge bilden. Mit Hilfe des energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Analysensystems (EDAX) ließen sich den Phasen bestimmte Elemente zuweisen, so daß auf Tetra-kalziumaluminathydrat, Calcit, Portlandit, Kalziumaluminiumsulfathydrat (Mono- oder

Trisulfat = Ettringit) geschlossen wurde. Bei der innerhalb der Deponie gelagerten Probe konnten dagegen keinerlei nadelige Kristalle mehr nachgewiesen werden; das ehemals gebildete netzartige Gefüge war nicht mehr vorhanden. Zusammen mit Ergebnissen der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) zeigten diese Befunde, daß eine Karbonatisierung mit Herauslösen der Zementphasen und Degeneration der Masse stattgefunden hatte.

## 2. Material und Methoden der Beständigkeitsuntersuchungen

### 2.1 Dichtwandrezepturen, Prüfkörper und Einlagerungsbedingungen

Die Rezepturen und Anrührvorschriften für die Herstellung der Dichtwandmassen wurden wie in [4] gewählt. Die Bezeichnung und Kurzbeschreibung ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Bezeichnung und Kurzbeschreibung der Dichtwandmassen.

Masse	Kurzbeschreibung der Masse
KT 1	Feststoffangereicherte Einphasenmasse mit Organosilan zur Steuerung der Rheologie (Typ Gerolsheim GH 79C)
KT 2	Konventionelle Einphasenmasse, Na-Bentonit-Zement
KT 3A	wie KT 2, jedoch 30 % des Na-Bentonits durch einen organisch modifizierten Bentonit substituiert
KT 4	Feststoffangereicherte Einphasenmasse, Fertigmischung I
KT 5	Einphasenmasse auf Na-Bentonitbasis, Fertigmischung II
KT 6	Erdbetonähnliche Zweiphasenmasse mit Kalksplitt und -mehl als Zuschlag

Aus den Dichtwandmassen wurden folgende Prüfkörper hergestellt:

1. Prismen mit der Abmessung 40 x 40 x 160 mm, für die Bestimmung der Druckfestigkeiten nach DIN 1164, Teil 7.
2. Zylinder mit  $D = 100$  mm und  $H = 100$  mm für die Untersuchung der Aufweichung mit Hilfe des Vicat-Nadelgerätes.
3. Zylinder,  $D = 50$  mm und  $H = 100$  mm für arretierte Lagerungsversuche mit anschließender scheinweiser Zerteilung und chemischen Materialuntersuchungen.

Die Norm 1164, Teil 7, sieht vor, daß die Prismen aus ihren Formen ausgeschalt werden, wenn sie genügend erhärtet sind und nicht mehr zerfallen. Bei den Dichtwandmassen war nach 4 Tagen eine dazu genügende Frühfestigkeit erreicht. Um ein Austrocknen zu vermeiden, wurden die Proben nach DIN 1164 bis zum Ausschalen mit einer Glasplatte abgedeckt, nach dem Ausschalen erfolgte eine Unterwasserlagerung. In entsprechender Weise wurde auch bei Zylindern verfahren, wobei die Zylinder mit 50 mm Durchmesser in ihren Rohrstützen verblieben (arretierter Lagerungsversuch).

Die Einlagerung erfolgte in abgedeckten, halb mit Hamburger Leitungswasser gefüllten 100 l-Kunststoffbecken. Die Becken waren mit Profilmatten ausgelegt, um einen ganzflächigen Bodenkontakt zu vermeiden. Je ein Teil der Proben wurde in einem Becken ohne und einem mit ständiger Begasung mit Kohlendioxidgas gelagert.

Bei den Becken wurde ständig das pH, sowie vom 20. Untersuchungstag an die Wasserhärte, kontrolliert. Bei den unbegasteten Becken variierte die Wasserhärte am ca. 20. Versuchstag zwischen 1,1 und 0,18 mmol/l und am 50. Tag wurde einheitlich 0,18 mmol/l gemessen. Bei den begasteten Becken lagen die Werte erwartungsgemäß sehr viel höher: 5,7 - 9,8 mmol/l am 20. Tag und 9,1 - 15,1 mmol/l am 50. Versuchstag. Bei allen unbegasteten Becken stieg das pH bereits während der ersten Versuchstage von ca. pH 8 auf pH 11 bis 12 an, um nach ca. 3 Wochen wieder etwas abzusinken. Die Spanne der Meßwerte betrug nach 50 Tagen pH 9,1 bis 11,2. Bei den begasteten Proben stellte sich nach wenigen Tagen ein pH von pH 5,9 bis 6,1 ein und blieb den Versuch über recht konstant.

## 2.2 Untersuchungsmethoden

Bei den *Nadelversuchen* [5] wird die oberflächliche Aufweichung an der Stirnfläche der Probekörper mit Hilfe der Vicat-Nadel (Durchmesser: 1 mm; Auflast: 300 g) überprüft. Zunächst wird die Stirnfläche vorsichtig an die arretierte Nadel herangeführt. Dann wird die Arretierung gelöst und dadurch die Dichtmasse unter dem Nadelfuß mit einer Flächenpressung von etwa  $3,8 \text{ N/mm}^2$  belastet. Die Eindringtiefe der Nadel kennzeichnet die Grenze, bis zu der eine deutliche Entfestigung eingetreten ist [5].

Zur Bestimmung der *Druckfestigkeit* wurden die Prismen nach der vorgesehenen Einlagerungsdauer von 28, 56 und  $90 \pm 2$  Tagen halbiert und die Halb-Prismen abgedrückt. Die Bestimmung erfolgte lastgesteuert; die Kraft wurde, wie in DIN 1164 vorgegeben, mit  $1,5 \pm 0,5 \text{ N/mm}^2$  in der Sekunde bis zum Bruch der Probe gesteigert. Bei einem Meßergebnis von z.B.  $1500 \text{ kN/m}^2$  würde der Bruch nach ca. 1 Sekunde eintreten. Beim weggesteuerten Versuch nach DIN 18136 und einer Steigerung um 0,2 % der Probenhöhe in der Minute (der Methode der GDA-Empfehlungen) wären dazu bei einer Bruchstauchung von 1% 5 Minuten erforderlich. Nach unserer Erfahrung liegen die Werte bei den Dichtwandmassen auf Grund der unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten nach DIN 18136 um den Faktor 1,5 bis 3 niedriger als nach DIN 1146.

Für die *Karbonatbestimmung* wurden Zylinder mit  $D = 50 \text{ mm}$  verwandt. Sie verblieben während der Lagerung in ihren PVC-Rohrstützen (arretierter Lagerungsversuch), da nur die Stirnflächen dem Schadstoffangriff ausgesetzt werden sollten. Nach den jeweiligen Lagerungszeiten wurden die Körper cm-weise in Scheiben zerteilt. Diese Proben wurden 24 h bei  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet, 1 h abgekühlt, zermörsert und eingewogen. Die eigentliche Karbonatbestimmung erfolgte nach Baur/Cramer in einem Spezial-Gefäß und Gasbürette, wobei das  $\text{CO}_2$ -Gas durch Einwirkung von HCl freigesetzt und anschließend volumetrisch bestimmt wurde.

Für die Bestimmung des *pH-Wertes* der erhärteten Massen wurden 1 cm-Probenscheiben wie oben hergestellt, luftgetrocknet, aufgemörsert und 2 g in einem Becherglas eingewogen. Es wurde lediglich die 1. und 5. (mittlere) Scheibe analysiert. Nach DIN 19684 Teil 1 soll das Material mit einer 0,01 n  $\text{CaCl}_2$ -Lösung in Feststoff/Lösungsverhältnis 1:2,5 versetzt werden. Dies ergab jedoch eine pastöse Masse.

Für diesen Fall sieht die Norm ein Verhältnis von 1:12,5 vor; entsprechend wurde hier vorgegangen.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Nadelversuche

Die Ergebnisse der Nadelungsversuche finden sich in Tabelle 2. Jeder dort angegebene Wert repräsentiert als Mittelwert 12 Einzelbestimmungen.

Tabelle 2: Eindringtiefe der Vicatnadel [mm] in die Stirnseite von Dichtwandmassen - Prüfcylindern (D = 100 mm, H = 100 mm) bei freier Unterwasserlagerung, ohne CO<sub>2</sub>-Begasung (obere Reihe) und mit CO<sub>2</sub>-Begasung (untere Reihe, kursiv)

Dichtwandmasse, Kurzbezeichnung	Zeit, Tage			
	14	28	42	56
KT 1 GH 79C Gerolsheim	0,16	0,16	0,16	0,18
	<i>1,62</i>	<i>2,21</i>	<i>2,03</i>	<i>2,39</i>
KT 2 Konventionelle Na-Bentonit-Mischung	0,59	0,41	0,49	0,49
	<i>4,70</i>	<i>6,95</i>	<i>8,65</i>	<i>8,79</i>
KT 3A Na-Bentonit mit Tixosorb	0,39	0,17	0,19	0,21
	<i>3,94</i>	<i>5,82</i>	<i>6,84</i>	<i>7,12</i>
KT 4 Fertigmischung 1 Feststoffangereichert	0,14	0,06	0,10	0,09
	<i>3,80</i>	<i>6,89</i>	<i>9,00</i>	<i>10,90</i>
KT 5 Fertigmischung 2 Na-Bentonit	1,37	0,98	0,92	0,84
	<i>7,72</i>	<i>12,74</i>	<i>16,84</i>	<i>20,42</i>

Die Masse KT 6 ist mit dem Nadelgerät wegen ihres Grobzuschlages nicht prüfbar. Bei den Lagerungsversuchen in *Wasser ohne Begasung* liegen die Werte nach 28 Tagen zwischen 0,06 und 0,98 mm; dabei ergibt sich folgende Rangfolge:

KT 4 < KT 1 < KT 3A < KT 2 < KT 5.

Diese Rangfolge ergibt sich auch nach 56 Tagen. Mit zunehmender Zeit wird die Nadeleindringung geringer, was auf die zunehmende Hydratisierung der Bindemittel zurückgeführt wird.

Aus Messungen der Nadel-Eindringtiefen im Bereich von mm-Bruchteilen können keine gesicherten Beurteilungen der eingesetzten Baustoffe abgeleitet werden, vielmehr besitzen die Massen eine gute Beständigkeit bei Einlagerung unter Wasser. Lediglich bei der Masse KT 5 war mit einer Nadel-Eindringtiefe von ca. 1 mm eine deutliche Oberflächenerweichung festzustellen.

Die Lagerungsversuche *mit CO<sub>2</sub>-Begasung* ergaben dagegen deutliche Effekte: die Meßwerte lagen zwischen 2,4 und 20,4 mm nach 56 Tagen. Von der ersten Messung nach 14 Tagen bis zur letzten nach 56 Tagen nehmen die Eindringtiefen um das 2 bis 3-Fache zu. Es zeigt sich folgende Rangfolge:

KT 1 < KT 3A < KT 2 < KT 4 << KT 5.

### 3.2 Druckfestigkeiten

Im Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Druckfestigkeiten angegeben. Jeder Wert repräsentiert den Mittelwert von 6 Einzelversuchen mit Halbpismen. Die Prüfung der unter *Wasser ohne Begasung* gelagerten Proben ergab Druckfestigkeiten nach 28 Tagen zwischen 3840 und 787 kN/m<sup>2</sup>. Die Rangfolge ist:

KT 6 > KT 4 > KT 1 > KT 5 > KT 3A > KT 2.

Die Druckfestigkeiten nehmen bei allen Massen bis zum 90. Tag noch etwas zu, die Rangfolge bleibt fast die gleiche:

KT 6 > KT 1 ≈ KT 4 > KT 5 > KT 3A ≈ KT 2.

Tabelle 3: Druckfestigkeit von Halbprismen nach DIN 1164, Teil 7, in kN/m<sup>2</sup>, bei freier Unterwasserlagerung, ohne CO<sub>2</sub>-Begasung (obere Reihe) und mit CO<sub>2</sub>-Begasung (untere Reihe, kursiv)

Dichtwandmasse, Kurzbezeichnung	Zeit, Tage		
	28	42	56
KT 1 GH-79	2460	2890	3315
Gerolsheim	<i>367</i>	<i>200</i>	<i>230</i>
KT 2 konv. Na-Bentonit	787	947	1230
Mischung	<i>153</i>	<i>133</i>	<i>230</i>
KT 3A Na-Bentonit	800	1053	1250
mit Tixosorb	<i>87</i>	<i>140</i>	<i>200</i>
KT 4 Fertigmischung 1	3113	3313	3280
Feststoffangereichert	<i>180</i>	<i>80</i>	<i>100</i>
KT 5 Fertigmischung 2	907	1300	1500
Na-Bentonit	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
KT 6 Masse mit	3840	4200	4280
Kalksplitt	<i>2033</i>	<i>1327</i>	<i>960</i>

Die Prüfung der *unter CO<sub>2</sub>-Begasung* gelagerten Proben ergab bis zum vollständigen Festigkeitsverlust führende Druckfestigkeiten. Die Werte reichten von 0 bis 2033 kN (28 Tage) bzw. 0 bis 960 kN (90 Tage). Die Rangfolgen nach jeweils 28 und 90 Tagen lauten:

28 Tage: KT 6 > KT 1 > KT 4 > KT 2 > KT 3A >> KT 5,

90 Tage: KT 6 > KT 1 = KT 2 > KT 3A > KT 4 >> KT 5.

Betrachtet man die Ergebnisse ohne die Masse KT 6, so wiederholt sich hier die Rangfolge aus dem Nadelungsversuch. Hier besteht auch ein unmittelbarer Zusammenhang: die Prismen haben einen tragenden Querschnitt von 40 mm x 40 mm = 1600 mm<sup>2</sup>. Bei einer randlichen Erweichung um 10 mm beträgt der Querschnitt des harten Kerns nur noch 20 mm x 20 mm = 400 mm<sup>2</sup>. Die Probe KT 5 besitzt bei 20 mm randli-



cher Aufweichung keinen tragenden Kern mehr. Allerdings scheint der Zusammenhang Nadeleindringtiefe/Druckfestigkeit nicht einfach linear mit der äußeren Erweichung korreliert zu sein. So ist z.B. bei KT 1 nach 14 Tagen erst 1,6 mm entfestigt, die Druckfestigkeit nimmt dagegen von 2460 (ohne Begasung) auf 267 (mit Begasung) ganz erheblich ab. Auch ist die Erweichung von KT 5 nach 15 Tagen so weit fortgeschritten, wie bei KT 2 und KT 3A nach 56 Tagen. Während letztere zu diesem Zeitpunkt aber noch eine Druckfestigkeit um  $140 \text{ kN/m}^2$  aufweisen, ist bei der Masse KT 5 bereits nach 14 Tagen keine Festigkeit mehr festzustellen.

Die beste Beständigkeit besitzt die Masse KT 6 (Zweiphasenmasse mit Kalkmehl und -splitt als Zuschlag). Diese Masse wurde von uns gerade im Hinblick darauf, daß hier eine besonders gute Beständigkeit gegen kalklösende Kohlensäure erwartet wurde, für die Baustoffprüfung vorgeschlagen. Die Meinungen zum Einsatz kalkhaltiger Zuschläge gehen weit auseinander. Während einerseits vertreten wird, bei denkbarem  $\text{CO}_2$ -Angriff möglichst inerte Zuschläge zu verwenden und Kalk zu vermeiden, wird andererseits gerade auf die hohe Pufferkapazität des Kalksteins verwiesen. Die Masse KT 6 wurde daraufhin konzipiert, mit hohem Kalkzuschlag eine große Pufferwirkung gegen  $\text{CO}_2$  zu erhalten. Die Ergebnisse geben diesem Konzept in hohem Maße recht; KT 6 ist die einzige Masse, bei der nach 90 Tagen die Festigkeit noch bei ca. 1 MN liegt. Allerdings zeigt sich auch bei KT 6 eine zwar zeitlich verzögerte aber signifikante Festigkeitsabnahme.

### 3.3 Karbonat- und pH-Messungen

Die Ergebnisse der Karbonatbestimmungen an den Prüfkörperscheiben, mit und ohne Begasung, finden sich in Tabelle 4. In Tabelle 5 sind die pH-Werte der ersten Scheibe (Stirnseite) und der fünften Scheibe (Probenmitte) angegeben. Nicht bestimmt wurden diese Parameter bei der Masse KT 6.

Bei den *ohne Begasung* gelagerten Proben lagen die Karbonatgehalte um 6 % (KT 1), 10 - 13 % (KT 2,3, und 5) und 22 % (KT 4). Letztere, die Fertigmischung 1, hat demnach Kalksteinmehl enthalten. Bei allen Massen liegen die pH-Werte in einem relativ engen Bereich um 11,5 und somit im Bereich von Massen mit Zement bzw. Zementähnlichen Bindemitteln.

Durch die *Begasung* steigen die Karbonatgehalte im äußersten exponierten Zentimeter innerhalb der ersten 30 Tage auf Werte zwischen 24 % (KT 1) bis 43 % (KT 3A) an. Zu diesem Zeitpunkt ist der Karbonat-Anteil in der zweiten Scheibe in der Masse KT 1 noch nicht erhöht, bei KT 2, KT 3A und KT 4 lediglich schwach (2-3 %), bei KT 5 jedoch bereits stark angestiegen. Die dritte Scheibe ist in keinem Fall angegriffen. Nach 54 Tagen ist die zweite Scheibe durchweg stark karbonatangereichert, der 3. und 5. cm allerdings noch nicht angegriffen (die erhöhten Meßwerte bei KT 1 sind wahrscheinlich ein Artefakt). Auch nach 90 Tagen sind in der Mitte des Prüfkörpers, Scheibe 5, noch keine signifikant höheren CO<sub>2</sub>-Werte festzustellen.

Tabelle 5: pH unter Wasser gelagerter Dichtwandmassen - Prüfcylinder (D = 50 mm, H = 100 mm) ohne (obere Reihe) und mit CO<sub>2</sub>-Begasung (unter Reihe, kursiv). Die Prüfkörper wurden cm-weise in Scheiben zerteilt; Scheibe 1 repräsentiert die exponierte Stirseite, Scheibe 5 die Probenmitte. Die Probenkörper wurden nicht ausgeschalt, verblieben also in ihren Hülzen ("arretierte" Lagerung).

Dichtwand- Masse	Zeit Scheibe Nr.	30 Tage		54 Tage		90 Tage	
		1	5	1	5	1	5
KT 1 GH-79 mit reduz. DWR-C-Anteil		11,4	11,5	11,2	11,4	11,2	11,6
		<i>8,5</i>	<i>11,4</i>	<i>8,2</i>	<i>11,1</i>	<i>8,3</i>	<i>11,5</i>
KT 2 konv. Na-Bentonit Mischung		11,8	12,3	11,4	11,6	11,6	11,8
		<i>9,0</i>	<i>11,6</i>	<i>8,5</i>	<i>11,6</i>	<i>8,5</i>	<i>11,7</i>
KT 3A Na-Bentonit mit Tixosorb		11,6	11,7	11,5	11,6	11,7	11,8
		<i>9,0</i>	<i>11,8</i>	<i>8,1</i>	<i>11,6</i>	<i>8,4</i>	<i>11,7</i>
KT 4 Fertigmischung 1 Feststoffanger.		11,2	11,3	11,2	11,3	11,5	11,5
		<i>8,9</i>	<i>11,2</i>	<i>8,7</i>	<i>11,3</i>	<i>8,6</i>	<i>11,5</i>
KT 5 Fertigmischung 2 Na-Bentonit		11,0	11,2	11,1	11,2	11,4	11,6
		<i>9,6</i>	<i>11,3</i>	<i>8,2</i>	<i>11,1</i>	<i>8,9</i>	<i>11,4</i>

Tabelle 4: Karbonatgehalte unter Wasser gelagerter Dichtwandmassen, in %. Prüfzylinder (D = 50 mm, H = 100 mm) ohne (obere Reihe) und mit CO<sub>2</sub>-Begasung (unter Reihe, kursiv). Die Prüfkörper wurden cm-weise in Scheiben zerteilt; Scheibe 1 repräsentiert die exponierte Stirnseite, Scheibe 5 die Probenmitte. Die Probenkörper wurden nicht ausgeschalt, verblieben also in ihren Hülsen ("arretierte" Lagerung).

Dichtwand- Masse	Zeit Scheibe Nr.	30 Tage				54 Tage				90 Tage		
		1	2	3	5	1	2	3	5	1	2	5
KT 1 GH 79 C Gerolsheim		6,9	6,7	6,9	7,2	6,6	6,2	6,3	6,4	6,2	5,8	5,5
		<i>23,8</i>	<i>6,9</i>	<i>6,9</i>	<i>6,5</i>	<i>29,3</i>	<i>34,6</i>	<i>11,6</i>	<i>12,8</i>	<i>24,8</i>	<i>21,3</i>	<i>6,2</i>
KT 2 Konv. Na-Bentonit Mischung		11,4	11,7	11,8	10,9	13,3	10,6	10,7	11,5	11,3	9,5	9,8
		<i>41,7</i>	<i>13,8</i>	<i>11,7</i>	<i>12,1</i>	<i>43,5</i>	<i>27,7</i>	<i>11,5</i>	<i>11,3</i>	<i>42,8</i>	<i>46,5</i>	<i>12,0</i>
KT 3 Na-Bentonit mit Tixosorb		10,2	10,1	9,9	10,5	12,2	11,2	10,5	10,9	10,5	9,5	9,8
		<i>42,7</i>	<i>13,4</i>	<i>10,2</i>	<i>10,6</i>	<i>44,1</i>	<i>24,3</i>	<i>11,1</i>	<i>11,4</i>	<i>43,9</i>	<i>37,7</i>	<i>11,3</i>
KT 4 Fertigmischung 1 Feststoffanger.		21,9	21,9	22,4	22,2	22,1	21,5	21,6	21,6	21,4	20,9	20,6
		<i>37,2</i>	<i>23,2</i>	<i>22,2</i>	<i>22,2</i>	<i>38,5</i>	<i>28,1</i>	<i>21,9</i>	<i>21,7</i>	<i>39,8</i>	<i>42,1</i>	<i>21,7</i>
KT 5 Fertigmischung 2 Na-Bentonit		13,4	12,3	11,0	11,0	12,3	11,2	11,0	11,1	11,2	9,5	9,5
		<i>28,0</i>	<i>19,2</i>	<i>11,0</i>	<i>10,9</i>	<i>29,3</i>	<i>30,3</i>	<i>11,2</i>	<i>11,5</i>	<i>26,4</i>	<i>35,8</i>	<i>11,6</i>

Auch die pH-Werte korrespondieren mit den Karbonatisierungserscheinungen. Bei allen Proben und zu allen Zeiten wurden in Scheibe 1 bei Begasung Werte um pH 8,5 gemessen. Dies zeigt, daß hier das Kalziumhydroxid vollständig karbonatisiert sein muß. In Scheibe 5 unterscheidet sich dagegen das pH mit Werten um 11,5 nicht von demjenigen der unbegasteten Proben.

Während die Nadel- und Druckfestigkeitsversuche ein sehr differenziertes Bild für das Verhalten der einzelnen Massen ergeben, ist die Karbonatisierungstiefe bei allen Massen sehr ähnlich und reicht nach 54 Tagen durchweg bis ca. 20 mm. Die mit der Nadel festgestellte Entfestigung läßt sich demnach nicht mit der Karbonatisierung erklären, vielmehr sollte diese zunächst zu einer weiteren Verdichtung des Materials führen. Die der Karbonatbildung folgende Auflösung der festigkeitsbestimmenden kalziumhaltigen Zementphasen als Hydrogenkarbonat folgt zur Tiefe hin stark verzögert der Karbonatfront.

#### 4. Zur Praxisrelevanz der Ergebnisse

Die Versuche mit kalklösender Kohlensäure haben bei Dichtwandmassen wesentlich stärkere Effekte gezeigt, als für Betonbauwerke in der Literatur beschrieben werden. An der Oberfläche exponierter Probekörper kommt es zu einer Entfestigung und es wurden im schlechtesten Fall bis zum vollständigen Festigkeitsverlust führende verminderte Druckfestigkeiten beobachtet. Es zeigt sich also, daß diese Angriffe für Altlastensicherungsbauwerke von besonderer, evtl. sogar erstrangiger Bedeutung sind.

Allerdings stellt der freie Lagerungsversuch im Wasser unter ständiger Begasung eine Überdimensionierung kalklösender Kohlensäure dar. In einem natürlichen Grundwasserkörper würde die Kohlensäure durch die Karbonatisierungsreaktion rasch verbraucht werden, und ein weiterer Angriff wäre durch die Nachlieferung des  $\text{CO}_2$  durch zuströmendes Wasser bzw. durch biochemischen Abbau organischen Materials begrenzt. Im Gegensatz dazu ist beim Begasungsversuch der Gehalt an kalklösender Kohlensäure zu keiner Zeit ein limitierender Faktor für einen fortschreitenden Angriff. Es war hier das Ziel, durch Überdimensionierung der Schadstoffangriffe Effekte während einer kurzen Prüfzeit erkennen zu können und Prognosen für sehr lange Zeiträu-

me zu ermöglichen. Eine konkrete Beurteilung ist jedoch nur im Einzelfall auf der Grundlage bauchemischer Boden- und Grundwasseruntersuchungen im Bereich geplanter Sicherungsbauwerke möglich, aus denen hervorgeht, in welchem Ausmaß mit kalklösender Kohlensäure und anderen Säureangriffen zu rechnen ist.

Aufgrund der Versuche kann jedoch eine vergleichende Bewertung der Massen vorgenommen werden. Demnach zeigt sich bei Masse KT 1, (GH 79C, Typ Gerolsheim, eine feststoffangereicherte Masse) eine vergleichsweise gute Beständigkeit gegen den sauren CO<sub>2</sub>-Angriff. Auch die Kalksteinsplitt und -mehl als Zuschlag enthaltende Zweiphasenmasse KT 6 ist - wie prognostiziert - wegen ihres hohen Puffervermögens besonders beständig. Allerdings kommt es bei beiden zu einer zwar verzögerten, aber deutlichen, zeitabhängigen Entfestigung. Die Mischung auf Natriumbentonit-Basis, Masse KT 5 ist im Gegensatz dazu besonders anfällig. Im Vergleich zu den anderen Massen zeigen sich somit Natriumbentonit-haltige Dichtwandmischungen in Bereichen mit erhöhten Konzentrationen von kalklösender Kohlensäure als weniger geeignet.

## 5. Zitierte Literatur

- [1] Locher, F.W., Sprung, S.: Die Beständigkeit von Beton gegenüber kalklösender Kohlensäure. *Betontechn. Ber.* 91-104 (1975)
- [2] Grube, H., Rechenberg, W.: Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer.- *Beton* **37** (11), 446-451 und (12), 495-498 (1987)
- [3] Schweer, C., Wienberg, R.: Untersuchungsergebnisse zweier Proben, 1x innerhalb, 1x außerhalb einer Deponie in Brunnen gelagert.- Unveröff. Untersuchungsber., 6 S und Anlagen (1991)
- [4] IGH Hannover gemeinsam mit Büro und Labor Dr. R. Wienberg: Kertess-Gelände/Hannover Südstadt - Vorabuntersuchungen an mineralischen Baustoffen für eine Einkapselungsmaßnahme.- Laborversuchsbericht, im Auftrage der Bundesbahndirektion Hannover, 89 S. und Anlagen (unveröff.)(1993)
- [5] Rogner, J.: Modelle zur Beständigkeitsbewertung von Dichtwandmassen auf der Basis von Lagerungsversuchen. *Diss. Univ. Hannover* (1993)

## Kurzfassung

Beständigkeit von Dichtwandmassen für die Altlasteneinkapselung gegen kalklösende Kohlensäure

*On the effect of carbon dioxide on the durability of slurry trench materials for the encapsulation of contaminated sites*

Reinhard Wienberg, Reza Khorasani

slurry walls, carbon dioxide, resolution of lime, carbonation of concrete, durability of construction material

Die Versuche mit kalklösender Kohlensäure haben bei den Dichtwandmassen erhebliche Effekte gezeigt. Die Entfestigung der Oberfläche der exponierten Prüfkörper, gemessen als Eindringtiefen im Vicat-Nadelungsversuch, lagen zwischen 2,4 und 20,4 mm nach 56 Tagen. Weiterhin zeigten sich bis zum vollständigen Festigkeitsverlust führende verminderte Druckfestigkeiten. Durch die Begasung mit CO<sub>2</sub> erfahren die äußeren Bereiche der Proben eine deutliche Karbonatisierung. Auch die pH-Werte korrespondieren mit den Karbonatisierungserscheinungen. Es zeigt sich, daß die Masse GH 79C, Typ Gerolsheim wesentlich beständiger gegen kalklösende Kohlensäure ist, als die anderen geprüften Einphasenmassen. Dagegen war eine Na-Bentonit-haltige Fertigmischung extrem anfällig. Eine kalksplitthaltige Zweiphasenmasse war wegen ihres hohen Puffervermögens besonders beständig. Allerdings kommt es auch hier zu einer zeitlich fortschreitenden Entfestigung.

## Anschrift der Autoren

Dr. Reinhard Wienberg  
Chemie und Biologie der Altlasten  
Büro und Labor Dr. R. Wienberg  
Gotenstraße 4  
20097 Hamburg

Prof. Dr. Reza Khorasani  
Fachhochschule Hamburg  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Hebebrandtstraße 1  
22297 Hamburg

## Quelle:

Wienberg, R., Khorasani, R.,: Beständigkeit von Dichtwandmassen für die Altlasten-  
einkapselung gegen kalklösende Kohlensäure. Altlasten-Spektrum, 4 (4), 192-198  
(1995)