

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M K A R L S R U H E

Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

KfK 3413

Auslaug- und Korrosionsuntersuchungen an zementierten
LAW/MAW-Abfallprodukten

P. Vejmelka, G. Rudolph, R. Köster

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Korrosionsuntersuchungen zeigen, daß MAW-Zementprodukte aus Hochofenzement, unter der Voraussetzung, daß die Proben genügend lange hydratisiert sind (mindestens 56 Tage, besser länger), bedeutend korrosionsbeständiger sind als Produkte aus Portlandzement.

Die Herstellungsbedingungen (unverdichtet, verdichtet) ergeben bei keinem der untersuchten MAW-Zementsteinprodukte einen Einfluß auf die Korrosionsbeständigkeit. Bei den angewandten Wasser/Zement-Werten (0,32-0,4) sind die Mischungen nach dem Vermischen bereits so dicht, daß z.B. durch Rütteln keine weitere Verdichtung mehr möglich ist. Von großer Bedeutung ist dagegen die Verdichtung bei der Herstellung zementarmer Mörtel- oder Betonmischungen mit einem entsprechend hohen Anteil an Sand bzw. Kieszuschlag und geringem Wasseranteil. Die Korrosion der Zementprodukte in quinärer Lösung wird durch Temperaturerhöhung deutlich beschleunigt. Proben aus Portlandzement sind z.B. bei 90°C bzw. 100°C bereits nach wenigen Wochen weitgehend zerstört. Erhöhter Druck (max. 130 bar) ergab dagegen unter den Versuchsbedingungen keine Beeinflussung des Korrosionsverlaufs und der Cs-Auslaugung. Dies bedeutet, daß die bisher vorliegenden Ergebnisse von Experimenten bei Normaldruck zur Auslaug- und Korrosionsbeständigkeit von MAW-Zementprodukten weiterhin als Eingangsdaten z.B. für Sicherheitsbetrachtungen verwendet werden können. Die Langzeitauslaug- und Korrosionsuntersuchungen mit einem Untersuchungszeitraum von ca. 3 Jahren zeigen ebenfalls, daß quinäre Lösung gegenüber MAW-Zementprodukten ausgesprochen korrosiv wirkt. Für Produkte mit unterschiedlicher Zusammensetzung ergab sich, daß Proben mit hohem Anteil an Zusätzen (20% Bentonit oder 10% Bentonit mit 6% Bariumsilikathydrat) unabhängig von der Zementsorte stark korrodiert waren. Proben mit einem Bentonitgehalt von 5% bzw. 10% zeigen keine sichtbare Korrosion.

Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Auslaugung ergaben Aktivierungsenergien für Cs von 14 Kcal/Mol bzw. 25 Kcal/Mol für Produkte ohne bzw. 10% Bentonit. Für Sr wurden Werte von 18 Kcal/Mol bzw. 15 Kcal/Mol für die entsprechenden Proben erhalten.

Auslaug- und Korrosionsuntersuchungen an zementierten
LAW/MAW-Abfallprodukten

1. Einleitung

Die in einer Wiederaufarbeitungsanlage anfallenden mittelaktiven Abfallkonzentrate sollen nach dem derzeitigen Planungskonzept zementiert werden.

In einem ersten Bericht über Untersuchungen zu MAW-Zementprodukten wurden vor allem Ergebnisse von Untersuchungen beschrieben, die die Bestimmung und Verbesserung des Auslaugverhaltens von MAW-Zementprodukten betreffen /1/.

Für Sicherheitsbetrachtungen zur Endlagerung von radioaktiven Abfallprodukten ist es darüber hinaus notwendig, die längerfristige Aktivitätsfreisetzung aus den Produkten unter den zu betrachtenden Störfallbedingungen zu ermitteln (Kontakt der Produkte mit gesättigten Salzlösungen unterschiedlicher Zusammensetzung, erhöhte Drucke und Temperaturen).

Da diese Untersuchungen jedoch aufwendig und langwierig sind, können in diese Untersuchungen nur optimierte Produkte eingesetzt werden. Zur Produktoptimierung ist es wiederum notwendig, vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlich zusammengesetzten Produkten durchzuführen um die Einflüsse von z.B. Zementart, Zusätzen, Herstellungsbedingungen, Angriffsmedium, Temperatur und Druck auf die Auslaug- und Korrosionsstabilität der Produkte zu ermitteln.

Aus diesem Grund wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Ermittlung der Korrosionsbeständigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton in Salzlösungen erarbeitet, bei dem der Einfluß der zahlreichen Parameter ermittelt werden soll. Um die Zahl der gleichzeitig zu untersuchenden Proben einzuengen, wurde dieses Programm in ein Vorprogramm (Dauer 6 Monate) und ein Hauptprogramm (Dauer ca. 2 Jahre) aufgeteilt. Im Vorpro-

gramm werden die Einflüsse von Zementart, Herstellungsbedingungen, Sandzusatz und Auslaugmedium erfaßt. Im Hauptprogramm erfolgt dann eine Einschränkung auf ein Auslaugmedium (quinäre Lösung, Pkt. Q), wobei der Einfluß der Produktzusammensetzung (unterschiedlicher W/Z-Wert, Bentonitzusatz) und der Temperatureinfluß ermittelt wird. Diese Untersuchungen werden bei 1 bar durchgeführt. Die Durchführung dieses Untersuchungsprogramms erfolgt im Auftrag von KfK/INE am Institut für Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (Leitung Prof. H. K. Hilsdorf).

Über die Ergebnisse des 6-monatigen Vorprogramms wird hier u.a. zusammenfassend berichtet. Die Ergebnisse des Hauptprogramms werden in einem später folgenden Bericht beinhaltet sein.

Untersuchungen zur Ermittlung des Druckeinflusses auf die Auslaug- und Korrosionsbeständigkeit zementierter Abfallprodukte wurden von KfK/INE durchgeführt. Dabei wurden die Proben am Institut für Baustofftechnologie hergestellt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Darüber hinaus werden die nun seit nunmehr ca. 3 Jahren bei INE laufenden Untersuchungen zum Auslaugverhalten unterschiedlich zusammengesetzter Zementprodukte weitergeführt, um aus dem Verlauf der Auslaugkurven zusätzliche Informationen über den Langzeitverlauf der Aktivitätsfreisetzung und die chemische Stabilität der Produkte zu erhalten. Ergänzend zu diesen Untersuchungen wurden weitere Auslaugversuche durchgeführt um den Einfluß unterschiedlicher Produktzusammensetzungen (Zementsorte, Bentonitzusatz, Zusatz von Fällchemikalien) auf die Cs- und Sr-Auslaugung zu ermitteln.

2. Beschreibung möglicher RN-Mobilisierungsprozesse

Die chemische Beständigkeit von Zementstein bzw. Mörtel oder Beton in wäßrigen Salzlösungen ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Es erscheint deshalb sinnvoll, zunächst eine kurze Beschreibung der Matrix Zementstein durchzuführen, um die beim Angriff wäßriger Salzlösungen ablaufenden Reaktionen besser verstehen zu können.

2.1 Beschreibung der Zementmatrix

Betrachtet man zementierte Verdampferkonzentrate mit einem Salzgehalt von ca. 10 Gew.-%, die darüber hinaus Zusätze (z.B. Bentonit) bis max. 5 Gew.-% enthalten, so läßt sich das Produkt in seinem strukturellen Aufbau durch reinen Zementstein hinreichend beschreiben. Bei zementierten Festabfälle, wie z.B. BE-Hülsen, liegt als Matrix reiner Zementstein bzw. Mörtel vor.

In Tabelle 1 sind die Hauptbestandteile handelsüblicher Portlandzemente aufgeführt.

Tabelle 1: Klinkerminerale des Portlandzementklinkers

| <u>Name</u> | <u>Bezeichnung</u> | <u>Anteil in %</u> | <u>Zusammensetzung</u> |
|-------------|--------------------|--------------------|---|
| Alit | C ₃ S | 30 - 60 | 3 CaO • SiO ₂ |
| Belit | C ₂ S | 15 - 37 | 2 CaO • SiO ₂ |
| Celit I | C ₃ A | 7 - 15 | 3 CaO • Al ₂ O ₃ |
| Celit II | C ₄ AF | 8 - 10 | 4 CaO • Al ₂ O ₃ • Fe ₂ O ₃ |

Die Klinkerminerale reagieren beim Vermischen mit Wasser unter gleichzeitiger Wärmeabgabe. Der Vorgang des Erhärtens setzt sich aus Hydratation und Hydrolyse zusammen, wobei die Hydratation hauptsächlich zu Beginn der Reaktion abläuft, die weiteren Vorgänge können als Hydrolyse betrachtet werden.

Tabelle 2 gibt die wesentlichen Reaktionen wieder, die beim Erhärten von Zement bei Temperaturen zwischen 20°C und 40°C ablaufen /2/.

Tabelle 2: Wesentliche Reaktionen, die beim Erhärten von Zement bei Temperaturen zwischen 20°C und 40°C ablaufen /2/

| Klinkermaterial | Wasser | Hydratisiertes Klinkermineral |
|--|----------------------|---|
| C ₃ S Alit 3 CaO · SiO ₂ | + n H ₂ O | → 2 CaO · SiO ₂ (n - 2) · H ₂ O + 2 Ca(OH) ₂ * CaO · SiO ₂ (n - 1) · H ₂ O + Ca(OH) ₂ |
| C ₂ S Belit 2 CaO · SiO ₂ | + m H ₂ O | → CaO · SiO ₂ (m - 1) · H ₂ O + Ca(OH) ₂ |
| 3 CaO · Al ₂ O ₃ (Celit I) in der "dunklen" Zwischenmasse (C ₃ A) | + 6 H ₂ O | → 3 CaO · Al ₂ O ₃ · 6 H ₂ O (vorübergehend auch 4 CaO · Al ₂ O ₃ · 14 H ₂ O - Bezeichnung: C ₄ AH ₁₄) |
| 4 CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃ (Celit II) in der "hellen" Zwischenmasse (C ₄ AF) | + z H ₂ O | → 3 CaO · Al ₂ O ₃ · 12 H ₂ O + CaO · Fe ₂ O ₃ · 5 H ₂ O auch [Fe(OH) ₃] (Sundius 1936) |

| Begleit-Substanzen | Wasser | Hydratationsprodukt |
|--|----------------------|---|
| Aus Brennfehlern stammendes freies CaO | + H ₂ O | → Ca(OH) ₂ |
| Zwecks Bindezeitregulierung zugegebenes CaSO ₄ · 2 H ₂ O | + n H ₂ O | → 3 CaO · Al ₂ O ₃ · 3 CaSO ₄ · 31 H ₂ O (Trisulfat)** 3 CaO · Al ₂ O ₃ · CaSO ₄ · 12 H ₂ O (Monosulfat)** |
| Aus den Rohstoffen stammendes freies MgO | + H ₂ O | → Mg(OH) ₂ (Brucit)*** |

* Die Hydratationsprodukte vom Alit und Belit haben wechselnde Zusammensetzung. Sie bilden die sogenannte Tobermoritische Phase, in der das Verhältnis CaO/SiO₂ zwischen 0,8 - 1,8 variiert, mit einem Mittelwert von 1,5. Der Ca(OH)₂ wird als Portlandit bezeichnet.

** In Verbindung mit C₃A (Candlot, Michaelis, 1901).

*** Die Hydratisierung des in kristallinischer Form vorhandenen MgO (Periklas) ist ein sehr langsamer Vorgang, infolgedessen wirkt eine durch Treiben begleitete Hydratation in dem erstarrten Beton zerstörend.

Das frische Gemisch aus Zement und Wasser wird als Zementleim bezeichnet. Beim Erstarren wird der Zementleim fest und geht in Zementstein über. Der Zementstein wird nach dem Powers'schen Modell /2/ als eine Substanz mit porösen Strukturen betrachtet. In dem aus einem äußerst feinverteilten kolloidalen Kalziumsilikathydrat-Gel bestehenden körnigen Teil - den T.C. Powers Zement-Gel benannte - ist ein aus wesentlich größeren Körnern bestehender Kristallanteil eingebettet. Die Poren sind teils durch Luft, teils durch Wasser ausgefüllt. Bei einem 100%-igen relativen Feuchtigkeitsgehalt ist der gesamte Porenraum durch Wasser ausgefüllt, während bei einer sich vermindernenden relativen Feuchtigkeit ein Teil des Wassers die Poren verläßt. Die Porosität des Zement-Gels hängt einerseits vom Ausgangswasserzementwert, andererseits von der Hydratation ab.

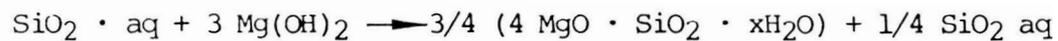
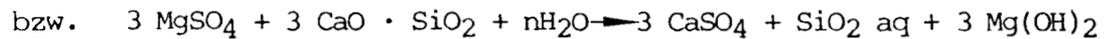
Nach T.C. Powers besteht das Porensystem aus Poren von zweierlei Typen. Die Abmessungen der zwischen den Teilchen des Zementgels befindlichen Poren, der Gelporen, sind mit den Abmessungen der Gelkörnchen nahezu identisch. Die Abmessungen der Gelporen betragen somit etwa 25 A, wobei die Gelporen etwa bis 20 - 30 Prozent des Zementsteinvolumens beanspruchen. Der weitere Teil des Porensystems besteht aus den wesentlich größeren Kapillarporen, die eine Größe von 1 bis 10 μm erreichen. Ihr Anteil am Volumen des Zementsteins liegt zwischen 0 und 40 %. Die Kapillarporen sind um so kleiner, je kleiner der Wasserzementwert ist. Neben den Abmessungen der Poren ist auch die Verbindung unter den Poren ein wichtiger Faktor.

Vom Gesichtspunkt der Korrosion schalten die Gelporen des Zementsteins aus, weil die durch sie hervorgerufene Wasserdurchlässigkeit sehr gering ist und in der Größenordnung derjenigen des Basalts gleichkommt; demgemäß ist also der Zementstein - trotz der Anwesenheit der Gelporen - praktisch noch wasserundurchlässig. Korrosionsangriffspunkte bedeuten jedoch die Mikrokanälchen, die ein Kapillarsystem bilden können, da sie dem aggressiven Wasser das Eindringen in den Betonkörper ermöglichen.

Abbildung 1 zeigt die Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit von Wasser/Zement-Wert (W/Z).

Bei Lösungen dieser Zusammensetzung tritt entweder reine Magnesia-Korrosion auf (wenn kein MgSO_4 enthalten ist) oder Magnesia-Sulfat-Korrosion.

Die wesentlichen Reaktionen, die hierbei ablaufen, lassen sich folgendermaßen formulieren /4/



Durch die Kristallisation von Gips kommt es zu Treibvorgängen, das parallel entstehende $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Magnesiumsilikathydrat) besitzt keine mechanische Festigkeit mehr.

Die Geschwindigkeit, mit der die Zerstörung der Proben erfolgt, ist abhängig von der Probenzusammensetzung, der Lösungszusammensetzung und der Versuchstemperatur.

2.3 Untersuchungsmethoden

Für vergleichende Korrosionsuntersuchungen sind die im folgenden aufgeführten Methoden allgemein gebräuchlich

- äußere Betrachtung des Schadensbildes
(Rißbildung, Quellung, Kristallisation)
- Untersuchung der chemischen Änderungen in den Probekörpern
(Röntgenbeugung, Mikrosondaufnahmen)
- Untersuchung der chemischen Änderungen in den Auslaugmedien
(Ca^{2+} -, Mg^{2+} -, SO_4^{2-} -Bestimmung)
- Messung von Längen- und Volumenänderung der Probekörper

- Messung der Festigkeitsänderung der Probekörper
(Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit)

- Messung der Änderung des dyn. E-Moduls

Durch die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der mechanischen Festigkeit der Probekörper (Bestimmung von Druck- und Biegezugfestigkeit) läßt sich der Korrosionsfortschritt recht gut verfolgen. Nachteil dieser Methode ist, daß es sich um eine zerstörende Prüfung handelt, und daß daher zahlreiche Probekörper benötigt werden. Es wurde deshalb auch bei Korrosionsuntersuchungen der Weg der zerstörungsfreien Untersuchung eingeschlagen. Eine dieser Möglichkeiten ist die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs des dyn. Elastizitätsmoduls (E-Modul). Die Bestimmung des dyn. E-Moduls kann entweder durch Messen der Resonanzfrequenz der Probekörper bei Anregung mit Schallwellen oder durch Messung der Dämpfung der Resonanzfrequenz bei mechanischer Anregung erfolgen /5, 6/.

Für beide Meßmethoden gilt, daß ihre Anwendung in Frage gestellt ist, wenn die Probekörper Risse oder größere Abplatzungen aufweisen.

Durch die Ermittlung des dyn. E-Moduls, der mit fortschreitender Korrosion erniedrigt wird, lassen sich Gefügeveränderungen, die durch Reaktion mit dem angreifenden Medium erfolgen, relativ schnell bestimmen. Bei vergleichenden Untersuchungen ist es dabei schon ausreichend, wenn der Meßwert der Resonanzfrequenz bzw. der Dämpfung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen wird.

Zum Einfluß der Verdichtung läßt sich sagen, daß die Mörtelmischungen mit einem W/Z-Wert von 0,45 gut verdichtbar sind. Werden sie nicht verdichtet, so entstehen Produkte mit vielen Löchern und einer sehr großen spezifischen Oberfläche. Verdichtete und unverdichtete Proben unterscheiden sich bei diesen Serien sehr stark in ihren Eigenschaften.

Die beiden unverdichteten Serien mit dem Portland- und dem Hochofenzement in quinärer Lauge sind nach 180 Tagen mechanisch völlig zerstört, während die Biegezugfestigkeiten aller anderen Proben nach 180 Tagen noch größer als ihre Ausgangsfestigkeit sind.

Aus dem Verlauf des dyn. E-Moduls läßt sich bei allen Zementen in quinärer Lauge ein sehr starker Abfall am Anfang beobachten, die unverdichteten Proben zeigen wegen der zum jeweiligen Zeitpunkt weiter fortgeschrittenen Reaktion den höchsten Abfall. Bei den Hochofenzement-Proben kann in Natriumchloridlösung und Wasser ein Anstieg beobachtet werden, der von der weiteren Hydratation der Hochofenschlacke herrühren dürfte. Ein Einfluß der Verdichtung ist dabei nicht festzustellen. Die Gewichtsänderungen in Wasser und Natriumchloridlösung lassen keinen Einfluß der Verdichtung erkennen. In quinärer Lauge nimmt das Gewicht anfangs ab, um dann nach einer für die jeweilige Probenart charakteristischen Zeit wieder anzusteigen. Bei den unverdichteten Serien liegt dieser Zeitpunkt unter 50 Tagen, während er bei den verdichteten Proben noch nicht festgelegt werden kann.

Bei den Portlandzementen zeigt sich der Einfluß der Verdichtung auf die Auslaugung an Ca^{2+} -Ionen sowohl in wesentlich höheren Auslaugungen zur gleichen Zeit bei den unverdichteten Proben, als auch darin, daß die Kurven in diesem Fall keinem Grenzwert zustreben.

Wie bei den salzfreien Mörtelprodukten ist es aufgrund der Vielzahl der durchgeführten Einzelmessungen nicht möglich, die Ergebnisse ausführlich darzustellen und zu diskutieren. Als Beispiel zeigen wiederum die Abbildungen 9 bis 15 die erhaltenen Ergebnisse bei der Lagerung von MAW-Zementsteinprodukten in quinärer Lösung. Für die untersuchten MAW-Mörtelprodukte werden vergleichbare Ergebnisse erhalten.

Die insgesamt erhaltenen Ergebnisse werden deshalb im folgenden wieder zusammengefaßt wiedergegeben.

Es zeigt sich, daß in Wasser die Hochofen- und Traßzementproben gegenüber den Portlandzementen die höhere Biegezugfestigkeit haben, in Natriumchloridlösung und quinärer Lauge ist dies umgekehrt. Die Druckfestigkeiten zeigen fast alle das gleiche Verhalten in allen Auslaugmedien.

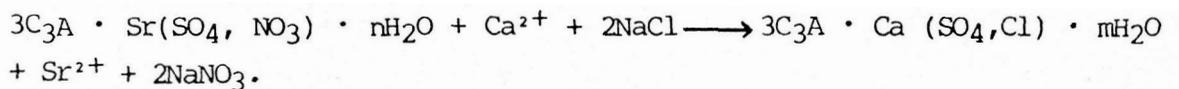
Der dynamische E-Modul nimmt in quinärer Lauge bei allen Proben stark ab, was wie bei den salzfreien Proben auf die austrocknende Wirkung der Lauge zurückzuführen ist. In Wasser und Natriumchloridlösung nehmen der E-Modul bei Hochofenzement i.a. stärker und bei Traßzement schwächer zu, was auf eine Nachhydratation dieser Zemente schließen läßt. Zwischen Wasser und Natriumchloridlösung kann kein Unterschied festgestellt werden. Das Gewicht der Proben nimmt in allen Fällen ab, in quinärer Lauge am stärksten, in Natriumchloridlösung am schwächsten. Die mechanisch sehr schlechten Hochofen- und Traßzement-Proben zeigen einen Anstieg der Gewichte, d.h. die Zerstörung ist auf die Bildung von Reaktionsprodukten in den Proben zurückzuführen.

Die Abgaben von OH^- -Ionen ist bei den Hochofenzementen geringer als bei den anderen Zementen, und zwar in allen Medien, d.h. dieser Effekt rührt allein von dem geringeren Alkaligehalt des Hochofenzementes her.

Bei der Abgabe von Ca^{2+} -Ionen haben in Wasser und Natriumchloridlösung die Portlandzemente die höchsten Raten, während in quinärer Lauge die Hochofenzemente am meisten abgeben. Die Unterschiede zwischen den Zementarten sind allerdings gering.

Die Cs^+ -Abgabe der Portlandzemente liegt um einen Faktor 2 bis 7 über dem der anderen Zemente in allen Medien. Die Werte aller Zemente in Wasser sind etwa doppelt so groß wie in quinärer Lauge.

Daraus kann man schließen, daß die in der quinären Lauge entstehenden festen Reaktionsprodukte die Cs^+ -Abgabe aus dem Probeninnern behindern. Dies kann allerdings keine Verstopfung der Poren sein, wie die in allen Medien etwa gleich großen Ca^{2+} -Auslaugungen zeigen, sondern muß eine spezifische Adsorption oder ein Einbau des Cs^+ in entstehende Reaktionsprodukte sein. Die hohen Auslaugungen in Wasser dürften in dem osmotischen Gefälle ihre Ursache haben. Im Gegensatz zu Cs^+ ist die Sr^{2+} -Auslaugung in Natriumchloridlösung bei den Portlandzementen deutlich höher als in Wasser, nicht jedoch bei den Hochofen- und Traßzement-Proben, d.h. bei den Portlandzementen kann eine Reaktion des Typs ablaufen:



Beim Traßzement und den Hochofenzementen werden das Cs^+ und Sr^{2+} vom Traß oder vom Hüttensand gebunden.

Hochofen- und Traßzement zeigen auch ein deutlich besseres Sr^{2+} -Rückhaltevermögen als die Portlandzemente. Die Reihenfolge der Auslaugungen für Cs^+ ist destilliertes Wasser > Natriumchloridlösung > quinäre Lauge und für Sr^{2+} Natriumchloridlösung > dest. Wasser.

Im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit der Proben aus unterschiedlichen Zementen ergeben sich bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Druckfestigkeit kaum Unterschiede zwischen den Proben im betrachteten Zeitraum von 180 Tagen.

Die Biegezugfestigkeiten der Hochofen- und Traßzementproben in Natriumchloridlösung nehmen stärker als die der Portlandzementproben ab. Auch in quinärer Lauge sind die Portlandzemente bezüglich der Biegezugfestigkeit besser.

Die deutliche Abnahme der Biegezugfestigkeit der Hochofenzementproben in Natriumchloridlösungen muß auf die Bildung voluminöser Kristallisationsprodukte zurückgeführt werden. Die Cs^+ - und Sr^{2+} -Auslaugung für die Hochofen- und Traßzementproben ist in allen Auslaugmedien deutlich geringer als die der Portlandzementproben.

Im Gegensatz zu den salzfreien Proben läßt sich bei den salzbeladenen Proben sowohl beim Zementstein als auch bei den Mörteln, die allerdings nur sehr wenig Sand enthielten, kein Einfluß der Verdichtung bzw. des Rüttelns der Proben erkennen. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß die Mischungen aufgrund ihrer Zusammensetzung nach dem Vermischen bereits so dicht sind, daß durch Rütteln der Proben keine weitere Verdichtung mehr erreicht werden kann.

Zwischen den untersuchten Mörteln ($S/Z = 0,5$) und den Zementsteinproben waren bis auf eine Ausnahme keine Unterschiede festzustellen. Die Hochofen- und Traßzementsteinproben zeigen in Natriumchloridlösung einen starken Abfall der Biegezugfestigkeit (um 80%). Bei den Mörteln ist der Festigkeitsabfall viel geringer, da dieser durch eine Reaktion des Zementsteins bewirkt wird. Der Sand reduziert den Volumenanteil des Zements, d.h. in den Mörtelproben läuft die festigkeitsmindernde Reaktion in geringerem Maße ab. Gleichzeitig behindern die Sandkörner das Wachstum der Risse, wodurch die Biegezugfestigkeit weniger stark abfällt als beim Zementstein.

Weiterhin ist anzumerken, daß außer beim dynamischen E-Modul die Streuungen bei den Mörtelproben geringer sind als bei Zementsteinproben, was vor allem auf den in diesen Proben reduzierten Zementsteinanteil zurückzuführen ist.

4. Literatur

- /1/ G. Rudolph, R. Köster
Stoffliche Untersuchungen zur Verfestigung mittelaktiver Abfall-
lösungen mit Zement: Auslaugbarkeit von Cäsium und Strontium
KfK 2842 (1979)
- /2/ I. Biczok
Betonkorrosion, Betonschutz
Bauverlag GmbH, Wiesbaden - Berlin (1968)
- /3/ J. D'Ans
Die Lösungsgleichgewichte der Systeme ozeanischer Salzablage-
rungen
Berlin 1933, Verlagsanstalt für Ackerbau
- /4/ W. Riedel, Ch. Göhring
Zementsteinkorrosion in Kalisalzlösungen
Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen,
Weimar
14. Jhrg., Heft 4, 329 (1967)
- /5/ I. Biczok
siehe /2/, S. 163
- /6/ | Gerätebeschreibung "Grindo sonic"
| J.W. Lemmens-Elektronika
| Lindelaan 2, B-3030 Heverlee
- /7/ E.D. Hespe
"Leach testing of immobilized radioactive waste solids",
A proposal for a standard method
Atomic Energy Reviews, 9, 195 (1971)

- /8/ W. Riedel
Die Korrosionsbeständigkeit von Zementmörteln in Magnesiumsalz-
lösungen
Zement, Kalk, Gips, 6, 286 - 296 (1973)
- /9/ H.G. Smolczyk
Chemical Reactions of Strong Chloride Solutions with Concrete
Proc. 5th Int. Symp. Chem. Cem, Tokio 1968, Vol. III, 274
- /10/ J. Heppner, S. Peter u. O. Weickhardt
Zur Beständigkeit von Tiefbohrzementen gegenüber Formations-
wässern mit höherem Gehalt an Magnesiumsalzen
Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, 84. Jhg. Oktober 1968, 371
- /11/ G. Mallow, et al.
European Appl. Res. Rept.
Nucl. Sci. Technol. 2, 453 (1980)