

KfK 4300
Juni 1988

Korrosionsverhalten lackbeschichteter Normalstahlbehälter bei der Zwischen- und Endlagerung schwachradioaktiver Abfälle

W. Hauser, B. Fiehn, S. Drobnik, D. Wiume
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik
Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik
Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe

KfK 4300

**Korrosionsverhalten lackbeschichteter Normalstahlbehälter
bei der Zwischen- und Endlagerung schwachradioaktiver Abfälle**

W. Hauser, B. Fiehn, S. Drobnik
D. Wieme ^{*)}

^{*)} Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In der Bundesrepublik Deutschland werden schwach- und mittelradioaktive Abfälle (z.B. Feststoffe, Konzentrate) nach der Konditionierung in lackbeschichtete Normalstahlbehälter eingebracht. Die hierfür eingesetzten Abfallfässer bzw. Stahlblechcontainer dienen als unabgeschirmte Verpackung bei der Zwischenlagerung, dem Transport und der Endlagerung in Konrad oder dem Salzstock Gorleben. Aufgrund der Genehmigungssituation für die geplanten Endlager sind Zwischenlagerzeiten bis zu 20 Jahren möglich. Während dieser Zeit, dem Transport zum Endlager und der Einlagerungsphase, ist die Integrität der Abfallgebinde erforderlich. Deshalb kommt der Beschreibung der Korrosionseigenschaften der in diesem Bericht beschriebenen Stahlblechverpackungen eine besondere Bedeutung zu. Aus diesen Gründen wurden Korrosionsuntersuchungen an epoxidharz- bzw. polyurethanbeschichteten und unbeschichteten Stahlblechproben durchgeführt. Bei den Untersuchungen wurden konstruktive Behälterdetails (z.B. Rundungen, Verschraubungen, Spalte, Schweißnähte) und handhabungsbedingte Beschädigungen (Lackrisse) berücksichtigt. Die Proben lagerten 6 bzw. 12 Monate sowohl in Abfallproduktsimulaten (Behälterinnenkorrosion) als auch unter simulierten Zwischenlager- (Lagerhalle) und Endlagerbedingungen (Lagerstrecken in Konrad und Asse, Salzlösungen) zur Beschreibung der Behälteraußenkorrosion. Unter vereinfachenden Randbedingungen wurde eine Extrapolation der Versuchsergebnisse durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, daß die hier beschriebenen Normalstahlbehälter mit einer 150 µm Epoxidharz-Innen- und Außenbeschichtung die an sie gestellten Korrosionsanforderungen erfüllen.

Corrosion Behavior of Carbon Steel Containers with Organic Coating during Interim Storage and Disposal of Low-Level Radioactive Wastes

Abstract

In the Federal Republic of Germany low and intermediate level wastes (e.g., solids, concentrates) are conditioned in carbon steel canisters with organic coating. For this purpose waste drums and steel sheet containers are used. They serve as unshielded packagings during interim storage, transport and disposal in the Konrad mine or in the Gorleben salt dome. Considering the licensing situation for the planned repositories, interim storage periods of up to 20 years are possible. During this period, the transport to the repository and in the operation phase of the repository, the integrity of the waste packaging must be guaranteed. Therefore, special attention must be paid to the corrosion behavior of the steel sheet packagings described in this report. For these reasons, corrosion studies were made on epoxy resin coated or polyurethane coated and uncoated steel sheet specimens. In the investigations design details of the containers (e.g., roundings, screwed connections, gaps, welded seams) as well as damage due to handling (cracks in the organic coating) were taken into account. The specimens were stored for six and twelve months, respectively, both in waste form simulates (inner corrosion of container) and under simulated conditions of an interim storage (storage hall) and of a repository (storage galleries in Konrad and Asse, salt brines) in order to be able to describe external container corrosion. Under simplifying boundary conditions an extrapolation is made of the test results. It has been possible to show that the carbon steel containers described here, provided with a 150 μm epoxy resin coating on the inner and external sides, fulfil the requirements imposed on them as regards their corrosion behavior.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Behälter für schwachradioaktive Abfälle	2
2.1 200 l-Abfallfaß	2
2.2 7 m ³ -Stahlblechcontainer	4
3. Abfallprodukte	5
4. Zwischen- und Endlagerung	7
4.1 Zwischenlagerung im Kernforschungszentrum Karlsruhe	8
4.2 Endlagerung in der Schachtanlage Konrad	9
4.3 Endlagerung im Salzstock Gorleben	10
5. Untersuchungsprogramm	11
5.1 Probenformen	12
5.2 Korrosionsmedien	14
5.3 Versuchsdurchführung	15
5.3.1 Lackbeschichtete Proben	16
5.3.2 Unbeschichtete Proben	17
6. Diskussion der Versuchsergebnisse	18
6.1 Korrosion der Behälterinnenseite	18
6.2 Korrosion der Behälteraußenseite	21
6.3 Extrapolation über den Versuchszeitraum hinaus	23
7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	25
Literaturverzeichnis	28
Abkürzungen	32
Tabellen	33 - 44
Abbildungen	45 - 58

1. Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland, wie auch in einer Vielzahl anderer Länder werden schwach- (LAW) und mittelradioaktive Abfälle (MAW) als vor-konditionierte Reststoffe in lackbeschichtete Normalstahlbehälter abgefüllt oder in diesen direkt konditioniert. Als Verfestigungsmittel wird derzeit zumeist Zement verwendet.

Diese lackbeschichteten Normalstahlblechbehälter dienen als unabgeschirmte Verpackung für LAW bei der Zwischenlagerung, dem Transport und der Endlagerung. Bei mittelradioaktiven Abfällen müssen zur Reduzierung der Strahlenbelastung die Stahlblechbehälter in eine zusätzliche äußere Abschirmung (Verlorene Betonabschirmung ^{*)}, Transportabschirmung) eingebaut werden. Während in der Vergangenheit überwiegend zylindrische Abfallfässer, die als Einzelgebilde gehandhabt wurden, Verwendung fanden, gewinnen in Zukunft immer mehr quaderförmige Abfallcontainer mit größerem Volumen an Bedeutung.

Aufgrund der Genehmigungssituation für die geplanten Endlager Eisenerzbergwerk Konrad bei Salzgitter und Salzstock Gorleben muß für die Abfälle mit Zwischenlagerzeiten von 10 bis 20 Jahren gerechnet werden. Während dieser Zeit, dem anschließenden Transport ins Endlager sowie einer hinreichenden Zeit im Endlager (.... die sich i.a. auf den Zeitraum der Einlagerung bis zur Schließung einer Lagerkammer erstreckt) ist die Integrität der Abfallgebilde erforderlich. Daraus ergeben sich Gebildeanforderungen, die sich auf die mechanische Belastbarkeit (z.B. Stapelbarkeit), die thermische (z.B. Brandverhalten) und die chemische Stabilität (z.B. Korrosionsverhalten) beziehen. Das bedeutet u.a., daß ein Korrosionsangriff an der Abfallverpackung nicht zu Durchrostungen im Behälterwerkstoff führen darf. Deshalb kommt einer Beschreibung der Korrosionseigenschaften der Stahlblechverpackung eine besondere Bedeutung zu.

In der Literatur gibt es eine Reihe von Untersuchungen zur Korrosion von Lackproben bzw. Normalstahl (z.B. /1 - 4/). Ihnen liegen jedoch nicht

^{*)} Verlorene Abschirmung deshalb, da die Abschirmung mit dem Abfallgebilde im Endlager verbleibt und damit für eine Weiterverwendung verloren geht.

die speziellen Bedingungen zugrunde, die für Behälter für radioaktive Abfälle zu berücksichtigen sind. Gegenstand des vorliegenden Berichts sind deshalb Untersuchungen, die das Korrosionsverhalten lackbeschichteter Normalstahlblechbehälter unter Zwischen- und Endlagerbedingungen beschreiben sollen. Hierbei wird der Korrosionsangriff sowohl an der Behälterinnenseite durch verschiedene Abfallprodukte als auch an der Behälteraußenseite durch die Lagermedien betrachtet. Die Untersuchungen wurden mit dem Ziel einer Bewertung des Korrosionsverhaltens der Stahlblechabfallbehälter durchgeführt.

2. Behälter für schwachradioaktive Abfälle

Für die Konditionierung schwachradioaktiver Abfälle gibt es derzeit in der Bundesrepublik i.a. die Stahlblechbehälter 200 l-Abfallfaß, 400 l-Abfallfaß und Stahlblechcontainer. Dabei sind zur Einlagerung in die Schachtanlage Konrad nicht mehr Einzelfässer, sondern aus Gründen der besseren Handhabbarkeit nur noch Container vorgesehen. Insgesamt gibt es hierfür 6 standardisierte Containertypen unterschiedlicher Abmessungen mit Brutto-Gebindevolumen von ca. 4 m³ bis 11 m³ (Container Typ I bis Typ IV /5, 6/).

Als Beispiel werden hier die im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) verwendeten Verpackungen wie 200 l-Abfallfaß und 7 m³-Stahlblechcontainer (Container Typ IV) diskutiert. Die Untersuchungsergebnisse in diesem Bericht lassen sich jedoch auch auf andere LAW-Behälter, bei denen die gleichen Werkstoffe Verwendung finden, übertragen.

2.1 200 l-Abfallfaß

Die derzeit im KfK verwendete Faßausführung stellt eine Weiterentwicklung der aus früheren Fässern (alte DIN 6635 /7/) abgeleiteten und in den Jahren 1966 bis 1979 verwendeten Rollreifen-Abfallfässer dar. Wie Korrosionsuntersuchungen an lackbeschichteten Rollreifen-Abfallfässern gezeigt haben, die 13 Jahre in einer gesättigten Salzlösung im ehemaligen Salzbergerk Asse lagerten, ergaben die aus Fertigungsgründen nicht beschichteten Bereiche zwischen Rollreifen und Faßmantel potentielle Schwach-

stellen /8/. Dies bewirkte einen durch den Spalteffekt verstärkten Korrosionsangriff im Faßmantel. Vorwiegend aus Korrosionsgründen wurde deshalb die Faßkonstruktion überarbeitet und ein in technischen Lackeignungsprüfungen (z.B. nach DIN 53 230 /7/) optimiertes Beschichtungssystem verwendet /9, 10/.

So wird seit 1979 im KfK als Standard-Abfallfaß das in Fig. 1 dargestellte 200 l-Rollsickenfaß eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein längsnahtgeschweißtes innen und außen lackbeschichtetes Stahlblechfaß. Sein Leergewicht ist ca. 60 kg bei einem zulässigen Füllgewicht von 500 kg. Der Faßboden ist eingeschweißt. Der mit 10 verzinkten M12-Schrauben aufgesetzte und über eine EPDM-Flachdichtung abgedichtete Deckel ist zur fernbedienbaren Hantierung als Pilzdeckel gefertigt. Im oberen Drittel der Fässer befindet sich die eingeprägte, schwarz lackierte Faßkennzeichnung.

Bei einem größten Außendurchmesser (Deckelflansch) von 632 mm hat das Faß eine Gesamthöhe von 926 mm. Die Blechwanddicken sind am Mantel 1,5 mm, am Boden 5,0 mm und am Deckel 3,0 mm. Eine Zusammenstellung der verwendeten Stahlblechwerkstoffe sowie deren chemische Zusammensetzung findet sich in Tab. 1. Bei der derzeitigen Faßausführung wird als Mantelblech USt 1303 statt USt 1203 verwendet. Beide Werkstoffe sind identisch bis auf die Maximalwerte der mechanischen Kenndaten (z.B. Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung; DIN 1623 /7/).

Das Abfallfaß ist innen und außen mit einer 150 µm dicken Epoxidharzbeschichtung versehen. Der Aufbau und die qualitative Zusammensetzung des Beschichtungssystems ist in Tab. 2 dargestellt.

Das hier kurz beschriebene Abfallfaß und die zugehörige Qualitätskontrolle ist ausführlich in den entsprechenden Datenblättern bzw. den "Technischen Liefer- und Abnahmebedingungen für Endabfallfässer in der Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe des KfK" dargelegt.

2.2 7 m³-Stahlblechcontainer

Im Laufe des Jahres 1986 wurden im KfK erste Stahlcontainer für die Verpackung schwachaktiver Abfälle eingeführt. Damit soll eine bessere Lager-raumausnutzung sowie eine einfachere Handhabbarkeit beim Transport und der Einlagerung und damit eine geringere Strahlenbelastung des Betriebspersonals im Vergleich zur Einzelfaßtechnik erreicht werden.

Die hier beschriebenen Stahlcontainer sind statisch so ausgelegt, daß sie u.a. eine 8-fach Stapelung im KfK-Zwischenlager erlauben. Acht eingeschweißte Stahlguß-ISO-Ecken (DIN 15 190 /7/) erleichtern die Hantierung mit Kran bzw. Stapler- und Ladefahrzeugen. Ein innenliegendes Tragegerüst, vergleichbar der Spantenbauweise im Schiffbau, gibt den Containern die erforderliche Steifigkeit. Die Stahlblech-Außenhaut hat am Mantel bzw. Deckel eine Wandstärke von 3,0 mm und am Boden 5 mm. Die Grundfläche der quaderförmigen Container hat die Abmessungen 1700 x 3000 mm bei einer Gesamthöhe von 1440 mm (Stapelhöhe 1400 mm).

Die so aufgebauten Stahlcontainer werden bei KfK in zwei unterschiedlichen Ausführungen verwendet.

- Faß-Stahlcontainer (vgl. Fig. 2)

Bei dieser Version des Containers wird der Innenraum mit 14 Stck. 200 l-Fässern oder 6 Stck. 200 l- und 3 Stck. 400 l-Fässern befüllt. Zur Fixierung dieser Einsatzfässer werden die Zwischenräume mit Fließmörtel verfüllt. Der Containerdeckel wird auf den frisch verfüllten Container aufgesetzt. Seine Befestigung erfolgt über angeschweißte Anker-eisen (vgl. Fig. 2), die nach Aushärtung des Verfüllmörtels fest eingegossen sind. Dabei hat der Deckel keine Abdichtfunktion. Diese ist vielmehr über die Verschlüsse der Einsatzfässer gegeben. Bei einem Leergewicht von 1500 kg ist der Container für ein zulässiges Betriebsgewicht von 20 000 kg ausgelegt.

- Produkt-Stahlcontainer

Im Gegensatz zum Faß-Stahlcontainer werden hier die Abfälle, wie insbesondere Schrottpreßlinge oder Bauschutt, nicht in Fässern sondern direkt in den Container eingebracht. Dabei dient eine am inneren Trägergerüst fixierte Eisenarmierungsmatte als Abstandshalter zur Containerwandung. Auch hier werden die verbleibenden Hohlräume mit Fließmörtel verfüllt. Das Leergewicht des Produkt-Stahlcontainers beträgt 1720 kg. Sein zulässiges Betriebsgewicht liegt bei 20 000 kg.

Bei beiden Containerausführungen wird im wesentlichen der in Tab. 1 charakterisierte Werkstoff St 37-2 verwendet. Wie im Fall der Abfallfässer sind diese Container außen mit dem Beschichtungssystem GW 97/82-1 (Tab.2) beschichtet. Die Container-Innenflächen sind hingegen nur mit der Epoxidharzgrundierung E1-613 mit 50 µm Dicke beschichtet.

Eine weitergehende Beschreibung beider Containerversionen findet sich in den zugehörigen Datenblättern und den "Technischen Liefer- und Abnahmebedingungen für Stahlcontainer zum Verpacken und Transportieren von radioaktiven Stoffen in der Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe des KfK".

3. Abfallprodukte

In der Bundesrepublik wird eine Vielzahl radioaktiver Abfälle konditioniert. Dies sind zumeist schwachaktive und in geringerer Zahl auch mittelaktive Abfälle, die beispielsweise beim Betrieb von Kernkraftwerken (z.B. Ionentauscherharze, Konzentrate) und bei deren Stilllegung (z.B. aktivierte/kontaminierte Großkomponenten) anfallen, die aus Großforschungseinrichtungen wie dem Kernforschungszentrum Karlsruhe stammen oder die vom Betrieb der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe herrühren. Die Abfälle unterscheiden sich in Zusammensetzung, Menge und Aktivitätsgehalt.

Im folgenden werden die für diesen Korrosionsbericht relevanten Daten der bei KfK/HDB konditionierten Abfälle diskutiert. Da hier alle wesentlichen schwach/mittelaktiven Abfälle verfestigt werden /5, 11/, gibt dies auch einen allgemeinen Überblick.

- Bauschutt, Erdreich

wird als lose Schüttung gleichzeitig mit einem Fließmörtel in Container verfüllt. Aufgrund der niedrigen Aktivitätswerte und der damit verbundenen geringen Dosisleistung werden hierfür Produkt-Stahlcontainer verwendet.

- Preßlinge mit verpreßbaren Reststoffen wie kontaminiertem bzw. aktiviertem Metallschrott, Kunststoffen, Zellulose, Aschen

Die preßbaren Materialien werden in 175 l-Stahlblechtrommeln gegeben und unter einer Hochdruckpresse zu scheibenförmigen Pellets verpreßt. Diese werden dann direkt in Container verfüllt (Produkt-Stahlcontainer) oder zuvor in 200 l-Fässer gegeben, die dann in Faß-Stahlcontainer eingesetzt werden. Die in den Containern verbleibenden Resthohlräume vergießt man mit Fließmörtel.

- Nicht preßbare Metallteile

werden soweit möglich zurechtgeschnitten, mit Fließmörtel in 200 l-Fässer vergossen und diese dann in Faß-Stahlcontainer eingesetzt. Größere Teile werden direkt in Container eingesetzt. Die verbleibenden Resthohlräume in den Containern werden mit Fließmörtel verfüllt.

- Flüssige Reststoffe wie Chemieabwässer, Konzentrate (zumeist nitrat-haltig), Schlämme, wäßrige Dispersionen von Ionentauscher- und Absorberharzen

werden direkt mit Zement PZ 45F in 200 l-Fässer konditioniert. Die Fässer mit den ausgehärteten Zementprodukten werden in Faß-Stahlcontainer eingesetzt und mit Fließmörtel fixiert.

Pro Jahr gelangen derzeit bei KfK/HDB ca. 4500 200 l-Fässer mit konditioniertem LAW/MAW zur Einbettung in Container.

Es werden von diesen Fässern ca.

- 57% mit Preßlingen,
- 13% mit nicht preßbarem zementiertem Schrott,
- 30% mit zementierten Konzentraten, Ionentauscherharzen und Absorbermaterialien

befüllt /12, 13/. Man ersieht daraus, daß ein Großteil zementierte Abfallprodukte sind. Für eine hohe mechanische Druckfestigkeit wird bei diesen Produkten im allgemeinen ein Wasser/Zement-Wert (W/Z) von 0,4 bis 0,5 angestrebt. Mit der zusätzlichen Zementmörtel-Resthohlraumverfüllung in den Containern ist also davon auszugehen, daß als wichtigstes Korrosionsmedium in den Fässern/Containern überwiegend Zementstein zu betrachten ist. Dabei ist man bei der Zementierung bestrebt, überstehendes Restwasser vollständig zu vermeiden. Man muß jedoch davon ausgehen, daß die Behälter nicht 100% verfüllt werden können und ein Resthohlraum über dem abgebundenen Zementstein verbleibt.

Im Gegensatz zur üblichen Abfallzementierung mit W/Z ca. 0,4 wurde ein Entwicklungsvorhaben bearbeitet, bei dem die Zementierung von Tritiumwässern aus der Wiederaufarbeitung von LWR-Brennelementen mit wesentlich höheren W/Z-Werten angestrebt wird /14 - 17/. Bei diesem Verfahren werden die Tritiumwässer mit einem quellfähigen Bentonit vermischt und mit einem Wasseranteil von ca. 85 Gew.-% in Großcontainer zementiert. Hierbei ist das HTO vollständig absorbiert. Das Verfahren wird als alternative Lösung zur Tiefenversenkung in poröse Schichten des geologischen Untergrundes untersucht.

4. Zwischen- und Endlagerung

Derzeit müssen schwach- und mittelradioaktive Abfälle ca. 10 - 20 Jahre in oberirdischen Zwischenlagern gelagert werden, bis das atomrechtliche Genehmigungsverfahren für Konrad abgeschlossen und Konrad als Endlager oder später auch Gorleben zur Verfügung stehen wird. Im Gegensatz zum ehemaligen Eisenerzbergwerk Konrad, wo die Bergwerkseinrichtungen weitestgehend vorhanden sind, muß das gesamte Bergwerk im Salzstock Gorleben

noch aufgefahren werden. Bei Konrad wird voraussichtlicher Einlagerungsbeginn Anfang der 90er Jahre sein, bei Gorleben Ende der 90er Jahre /19/.

4.1 Zwischenlagerung im Kernforschungszentrum Karlsruhe

Als Beispiel werden im folgenden die Verhältnisse bei der Zwischenlagerung von LAW auf dem Gelände des Kernforschungszentrums Karlsruhe /5, 11, 13/ beschrieben.

Nach Schließung der Schachanlage Asse II /18/ für die Endlagerung von LAW wurde von 1979 - 1983 ein erstes Lagergebäude (B 519) mit konditionierten Einzelfässern bzw. Einzelfässern in Verlorenen Betonabschirmungen befüllt. Hierbei handelt es sich um eine über Schlitze in den Toren nur spärlich belüftete Lagerhalle mit Beton-Mauersteinwänden und einem Stahlblechdach auf einer Trägerkonstruktion. Die ca. 5 m hohe Halle hat eine Grundfläche von 61 x 94 m und ist in 6 durch Zwischenwände getrennte Kammern unterteilt. Das jetzt vollständig befüllte Lager enthält 12 000 unabschirmte 200 l-Abfallfässer die 4-fach und 8000 Verlorene Betonabschirmungen mit Einzelfässern die 3-fach übereinander gestapelt sind. Die Behälter wurden mit Staplerfahrzeugen eingebracht. Bei dieser Lagertechnik waren Lackbeschädigungen unvermeidbar.

Seit 1983 steht ein zweites deutlich größeres Zwischenlagergebäude (B 526) zur Verfügung. Im Gegensatz zum ersten Lager ist dieses jetzt ausschließlich für die Lagerung von KfK-Containern in Stahlblech- oder Betonausführung bestimmt.

Die über große Lüftungsöffnungen in den Betonaußenwänden natürlich belüftete Lagerhalle hat die Grundfläche 49 x 93 m und ist 20 m hoch. Das Gebäude ist in 2 Lagerkammern unterteilt. Jede Kammer nimmt 2592 Container auf. Sie werden dabei 8-fach übereinander gestapelt. Der Transport erfolgt mit einem Staplerfahrzeug, das den Container an den ISO-Ecken greift. Im Vorraum des Zwischenlagers werden die Container von einem Brückenkran übernommen und an der jeweiligen Lagerposition abgesetzt.

4.2 Endlagerung in der Schachtanlage Konrad

Für eine Einlagerung in Konrad sind Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung geplant. Hierbei sind nur noch Container bzw. Einzelabschirmungen auf Transportpaletten, aber keine Einzelfässer mehr vorgesehen /5, 6, 19/. Der Transport der Abfallgebände erfolgt auf Straßen- oder Schienenfahrzeugen zum Endlager und untertage vom Förderkorb zum Einlagerungsstandort mit Ladefahrzeugen (gleislos). Die Container werden in bis zu 1000 m lange Einlagerungsstrecken eingebracht, die in mehreren Sohlen in Teufen von 800 m - 1300 m im Erzlager aufgefahren werden /6, 20/. Bei einem Kammerquerschnitt von ca. 40 m² können maximal 3 Container übereinander gestapelt werden. Die Einlagerung der Abfallgebände wird so erfolgen, daß die dichteste Packung, weitestgehend ohne Freiräume zwischen den Containern erzielt wird. Die verbleibenden Resthohlräume zwischen Containerstapel und Streckenwand werden mit Eisenerzversatz, das bei der Hohlraumstellung anfällt, verfüllt. Nach der Befüllung und Versatzeinbringung werden die Einlagerungsstrecken mit Abschlußdämmen gegenüber dem übrigen Grubengebäude und damit gegenüber der Grubenbewetterung verschlossen.

Abhängig von der Einlagerungssohle liegt die Gebirgstemperatur im Bereich von 34 -49°C. Während des Einbringens der Abfallbehälter werden die Einlagerungsstrecken über die Grubenbewetterung zwangsbelüftet. Hierbei liegt der Gesamtwettervolumenstrom zwischen 100 bis 130 m³/s. Er teilt sich entsprechend der Wetterführung auf die verschiedenen Sohlen auf, so daß in den Einlagerungsstrecken mit ca. 20 m³/s bewettert wird /20/. Die Bewetterung bewirkt eine Herabsetzung der Temperaturen in den Strecken auf Werte zwischen 20 - 33°C und bei niedriger Luftfeuchte übertage auch eine Herabsetzung des Wasserdampfgehalts der Luft untertage. Dieser ist durch den Feuchtegehalt des Gebirges (geologisches Tiefenwasser) und dem der einziehenden Wetter bestimmt. Abhängig vom Klima übertage und dem untertägigen Standort wurden im Wetterstrom relative Luftfeuchten von 50 - 80% gemessen /20/.

Nach Abschluß einer Einlagerungsstrecke steigen Temperatur und Feuchtegehalt wegen des Wegfallens der Bewetterung an. Es wird ein Gleichgewichtszustand erreicht, der durch die entsprechende Gebirgstemperatur und durch

die Gebirgsfeuchte, die sich durch Zulauf geologischer Wässer einstellt, bestimmt ist. So wurde bei Versuchen in einer Wetterteststrecke auf der 1250 m Sohle ca. 1,5 Jahre nach Versiegelung der Strecke und Abschalten der Bewetterung ein stationärer Zustand mit 42°C und 82% relativer Luftfeuchte erreicht /20/. Eine typische Zusammensetzung der geologischen Tiefenwässer findet sich in Tabelle 4.

4.3 Endlagerung im Salzstock Gorleben

Nach dem auf das Jahr 1978 zurückgehenden Planungsstand für Gorleben ist vorgesehen, das Grubengebäude so aufzufahren, daß es getrennte Einlagerungsbereiche für wärmeentwickelnde Abfälle (hochradioaktive Abfälle sowie obere MAW-Kategorie wie Hülsen/Strukturteile, Feedklärschlamm, Core-Bauteile) und nicht wärmeentwickelnde Abfälle (LAW/MAW) geben wird /21/. Für LAW/MAW liegt das Einlagerungsniveau zwischen 830 und 900 m Teufe. Es gibt nur eine Einlagerungssohle. Nach diesem Konzept sollen die in 400 l-Fässer bzw. verlorenen Einzelbetonabschirmungen konditionierten Abfälle in folgender Weise in entsprechende Einlagerungskammern eingebracht werden /21, 22/ (Einlagerungskonzept aus dem Jahr 1978).

- Kammerversturztechnik

Eine Variante für die Einlagerung unabgeschirmter Abfallfässer ist die Kammerversturztechnik. Dabei werden die Fässer in eine Einlagerungskammer eingebracht, von oben über eine Schütthalde abgekippt und mit Salzgrus (granuliertes Steinsalz) überdeckt. Die Kammern haben die Grundfläche 60 x 15 m und sind 20,5 m hoch.

- Stapeltechnik

Bei der Stapeltechnik werden die Abfallbehälter hingegen in geordneter Reihenfolge über- und aneinander gestapelt. Dabei nimmt ein Koordinaten-Kran die Behälter auf und setzt sie an der entsprechenden Position ab. Diese Technik ist für Abfälle in 400 l-Fässern und in Verlorenen Einzelbetonabschirmungen vorgesehen. Die Kammern sollen Grundflächen von 100 x 15 m und Höhen von 25,5 m haben.

Der untertägige Transport vom Förderkorb zur Einlagerungskammer soll auch hier mit nicht schienengebundenen Ladefahrzeugen erfolgen. Im Gegensatz zur Einlagerung in Konrad, wo nur noch Großgebände verwendet werden sollen, sieht der ältere aber derzeit noch gültige Planungsstand für Gorleben eine Einlagerung in 400 l-Fässern oder Einzelbetonabschirmungen vor /21/. Es ist jedoch zu erwarten, daß auch hier eine Einlagerung von Containergebänden (Stapeltechnik) erfolgt.

Zur Beschreibung der Korrosionsbedingungen für die Abfallgebände ist hervorzuheben, daß derzeit noch keine Meßdaten für das Endlagerbergwerk Gorleben vorliegen, weil die Auffahrung des Grubengebäudes noch aussteht. Da prinzipiell keine wesentlichen Unterschiede zu erwarten sind, werden aus diesem Grunde die hierfür notwendigen Meßdaten aus der Schachanlage Asse herangezogen. So wird im LAW/MAW-Einlagerungsbereich im Gorleben-Grubengebäude entsprechend dem geothermischen Gradienten der Asse mit einer Gebirgstemperatur von ca. 40°C gerechnet. Während der Einlagerungsphase reduziert sich diese Temperatur aufgrund der Grubenbewetterung auf Werte um 30°C.

Im Gegensatz zu den feuchten Verhältnissen nach Verschuß einer Einlagerungsstrecke in Konrad werden hier die Abfallgebände von trockenem Steinsalz, dessen Wassergehalt im Bereich von 0,01 - 0,5 Gew.-% liegt, umgeben. So wurde auf der Schachanlage Asse über ein 300 m Bohrloch ein mittlerer Wassergehalt von 0,1 Gew.-% gemessen /23/. Lediglich bei einem in Störfallscenarien postulierten Wasserzutritt, der mit konservativer Betrachtungsweise erst nach Verschuß des Endlagerbergwerks auftreten kann, müßte mit einem Kontakt zwischen Abfallbehälter und Salzlösung gerechnet werden /24/. Deren Zusammensetzung hängt dabei von der Art der anstehenden Salzminerale und dem Störfallablauf ab. Als eine der Möglichkeiten wird die quaternäre Salzlösung vom Typ Q genannt. Ihre Zusammensetzung findet sich in Tab. 4.

5. Untersuchungsprogramm

Bei den an lackbeschichteten Rollreifenfässern nach 13-jähriger Außenkorrosionsbeanspruchung im Salzbergwerk Asse (Korrosionsmedium: trockenes Steinsalz, gesättigte Salzlösung) durchgeführten Untersuchungen /8/ zeig-

te es sich, daß die konstruktive Behälterauslegung erwartungsgemäß wesentlichen Einfluß auf das Korrosionsverhalten hat.

Bei den hier beschriebenen, deutlich umfangreicheren Versuchen wurden deshalb beschichtete Stahlblechproben verwendet, die alle wesentlichen korrosionsbezogenen Behältereigenschaften, wie Rundungen, Schweißnähte, Verschraubungen, Spalte oder mögliche Lackbeschädigungen simulieren. Die Untersuchungen wurden so ausgelegt, daß die Behälterkorrosion bei der oberirdischen Zwischenlagerung bzw. bei der Endlagerung in einem Salzstock oder im Eisenerzbergwerk Konrad über den Zeitraum von ca. einem Jahre nachvollzogen wurde. Hierbei ist der Korrosionsangriff sowohl an der Behälterinnenseite (durch das Abfallprodukt) als auch an die Behälteraußenseite (durch das Lagermedium) berücksichtigt worden. Es wurden insgesamt ca. 350 Proben verwendet, die 9 Korrosionsmedien bei unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt waren.

Die Festlegung der dominierenden Korrosionsart und die Bestimmung des zeitlichen Korrosionsverlaufs für den Versuchszeitraum ermöglichen eine unter vereinfachenden Annahmen durchführbare Extrapolation der Untersuchungsergebnisse. Die beschriebene Vorgehensweise entspricht dabei annähernd der Versuchsdurchführung, wie sie für Korrosionsuntersuchungen am MAW-Behälterwerkstoff Sphäroguß GGG 40 gewählt wurde /25/.

5.1 Probenformen

Für die Korrosionsuntersuchungen wurde das bei der Herstellung von LAW-Behältern übliche Stahlblech USt 1203 bzw. die beruhigte Qualität RSt 37-2 verwendet. Die Werkstoffzusammensetzung sowie die DIN-genormten Bezeichnungen finden sich in Tab. 1.

Vor der Beschichtung und Lagerung der Proben in den Korrosionsmedien wurde die Stahlblechoberfläche mit der Körnung SA 2 1/2 strahlentrostet. Es wurden folgende Probenformen verwendet, deren Ausgangszustand in Fig.4-13 zu ersehen ist:

- beidseitig lackbeschichtete ebene Proben in den Abmessungen 1,5x100x 200 mm mit einem bis auf den Blechwerkstoff durchgehenden Lackriß (eingeritzt mit Ritzstichel Typ Sikkens DIN 53 167) auf einer Seite (vgl. Fig 4 - 5, 9 - 10),
- unbeschichtete ebene Proben in den Abmessungen
 - * 1,5 x 100 x 200 mm bzw.
 - * 3,0 x 50 x 100 mm (vgl. Fig. 6, 11),
- unbeschichtete, ebene verschraubte Proben in den Abmessungen 1,5x50x 100 mm (Sandwichproben) mit eingelegtem 1,5 mm Zn-Draht und verzinkten Schrauben (vgl. Fig. 7, 12),
- unbeschichtete, quer gebogene Proben in den Abmessungen 1,5x50x100 mm mit Längsschweißnaht (vgl. Fig. 8, 13).

Für die beschichteten Proben wurde zum einen das in Tab. 2 spezifizierte 150 µm dicke Epoxidharz-Beschichtungssystem GW 97/82-1 der Firma Geholit und Wiemer verwendet. Dieses Beschichtungssystem wurde aufgrund eines breit angelegten Kurzzeit-Testprogramms (im wesentlichen Lacktests) im Jahre 1981 aus mehreren Systemen ausgewählt und wird seither für die Innen- und Außenbeschichtung der bei KfK verwendeten 200 l-Stahlblechfässer und Stahlblechcontainer verwendet.

Als Ergänzung hierzu wurden weiterhin Proben mit einem deutlich dickeren Beschichtungssystem beschichtet. Das in Tab. 3 näher bezeichnete ca. 500 µm dicke Polyurethan-Beschichtungssystem zeichnet sich durch eine hohe Elastizität bei Biegebeanspruchung aus, was Vorversuche gezeigt haben /10/. Die gegenüber dem Epoxharz-System um den Faktor ca. 3,5 größere Schichtdicke wurde gewählt, um die etwa um den gleichen Faktor höhere Wasserdampfdurchlässigkeit der Polyurethan-Beschichtung /4/ (bei gleicher Schichtdicke von 150 µm) zu kompensieren.

Es wurden jeweils 3 Parallelproben (vereinzelt 2) pro Probenform und Korrosionsmedium für ca. 6 und 12 Monate der Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt.

5.2 Korrosionsmedien

Eine Zusammenstellung der bei den Korrosionsuntersuchungen berücksichtigten Abfallprodukte und Lagerbedingungen für die Behälter findet sich in Tab. 4. Weiterhin sind in dieser Tabelle die entsprechenden Versuchsbedingungen dargestellt.

Für den Angriff an der Behälterinnenseite wurden Zementabfallprodukte mit und ohne Natriumnitrat betrachtet. Wegen der einfacheren Handhabung lagerte man jedoch die Korrosionsproben in den zugehörigen wäßrigen Lösungen (inaktive Simulate). Lediglich für das in Kap. 3 beschriebene Tritiumwasser/Bentonit-Zementabfallprodukt wurde ein ausgehärtetes inaktives Produkt verwendet. In allen Fällen wurde ein Teil der Proben nur zur Hälfte mit den Produkten in Kontakt gebracht. Entsprechend den Verhältnissen bei der Zwischen- und Endlagerung wählte man die Versuchstemperatur 22°C (Raumtemperatur) und 50°C (Trockenschrank).

Nach dem Verschluß zementierter Abfallfässer (zumeist ca. 24 Std. nach der Zementierung) kann die Behälterinnenseite einer erhöhten Wasserdampfeinwirkung (Schwitzwasser) ausgesetzt sein. Da die Wasserdampfdurchlässigkeit ein wesentliches Qualitätsmerkmal für Lackbeschichtungen darstellt, wurden weiterhin eine Reihe von Proben im DIN-genormten Schwitzwasserkonstantklima (DIN 50 017 /7/) bei 40°C und 100% rel. Luftfeuchte in einem Klimagerät (sog. Kesternichgerät) ausgesetzt.

Für die Außenkorrosion der Behälter konnten die Proben weitestgehend unter in situ-Bedingungen gelagert werden. Die Simulation der Zwischenlagerung erfolgte im überdachten Lagerbereich des Zwischenlagers auf dem Gelände des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Dabei waren die Proben den atmosphärischen Temperatur- und Feuchteschwankungen, jedoch nicht dem Regen ausgesetzt.

Die Probenlagerung unter salinaren Endlagerbedingungen wurde in einer bewetterten Strecke auf der -775 m-Sohle der Schachtanlage Asse simuliert. Entsprechend dem Einbringen von Salzversatz als Zwickelfüllung zwischen die LAW-Behälter (vgl. Kap. 4.3) sind die Proben mit Salzgrus (granulier-

tes Steinsalz) überdeckt worden. Weiterhin wurde der in Störfallszenarien angenommene Fall eines Kontakts der Abfallbehälter mit gesättigten Salzlösungen untersucht. Hierzu lagerten die Proben in einer quinären Salzlösung des Typs Q (Zusammensetzung siehe Tab. 4) mit NaCl als Bodenkörper bei 50°C im Klimaschrank.

Für eine Behälterlagerung im ehemaligen Eisenerzbergwerk Konrad lagerten die Proben auf der -1250 m-Sohle dieses Bergwerks in der in Kap. 4.2 beschriebenen sog. Wetterteststrecke bei 42°C und 82% rel. Luftfeuchte. Dabei waren die Proben vollständig mit Eisenerzversatz überdeckt. Da die Wetterteststrecke im Versuchszeitraum nicht an die Grubenbewetterung angeschlossen war, entsprachen die Versuchsbedingungen genau dem Zustand, der ca. 1,5 Jahre nach der Versiegelung einer Einlagerungsstrecke vorherrscht (vgl. Kap. 4.2). Zusätzlich wurden Proben in salzhaltigem geologischem Tiefenwasser (Eisenerzgranulat als Bodenkörper) der in Tab. 4 angegebenen Zusammensetzung bei 50°C im Klimaschrank gelagert.

Bei den Laborversuchen wurden die Proben in lose verschlossene Kunststoffbehälter, die die entsprechenden Korrosionsmedien enthielten, eingehängt (Sauerstoffzutritt möglich). Zur näheren Charakterisierung der Lösungen zeigt Fig. 3 die im Temperaturbereich von 22°C bis 55°C gemessenen Sättigungskonzentrationen von Luftsauerstoff und die pH-Werte der Korrosionslösungen. Danach nehmen mit steigender Temperatur Sauerstoffgehalt und pH-Wert der Lösungen ab. Während bei Raumtemperatur für PZ-Lösung und Konrad-Wasser die Sauerstoffsättigungskonzentration bei ca. 8 mg/l liegt, wird für beide Lösungen bei 55°C nur noch ca. 5,5 mg/l gemessen. Für die gesättigte Salzlösung (Q-Lösung) liegt der Sauerstoffgehalt mit ca. 3 mg/l bei 55°C deutlich niedriger. Die nur geringfügig temperaturabhängigen pH-Werte liegen für die Zementlösungen im Bereich um $12 < \text{pH} < 13$, für Konrad-Wasser bei pH ca. 6,3 und für Q-Lösung $5 < \text{pH} < 6$.

5.3 Versuchsdurchführung

Entsprechend der unterschiedlichen Vorgehensweise wurde eine Aufteilung der Untersuchungsmethoden bzw. Meßgrößen für lackbeschichtete und unbeschichtete Proben vorgenommen.

5.3.1 Lackbeschichtete Proben

Nach Entnahme aus den Korrosionsmedien und einer ersten Probeninspektion erfolgte eine Reinigung der Proben mit Wasser. Wenn vorhanden, wurden fest anhaftende Korrosionsprodukte zusätzlich mit einer Bürste entfernt, die Proben in Spiritus getaucht und mit Warmluft bzw. im Exsikator getrocknet. Es wurden folgende Meßgrößen ermittelt:

- Glanzverlust

Nach DIN 53 209 /7/ wurde der Blasengrad ermittelt (Probenrückseite ohne Lackriß). Er kennzeichnet die in der Beschichtung aufgetretene Blasenbildung nach Größe und Häufigkeit. In dieser Norm wird die Häufigkeit durch den Kennbuchstaben m und eine Kennzahl ausgedrückt. Dabei bedeutet der Kennwert m0 Blasenfreiheit. Bis zum Kennwert m5 nimmt die Anzahl der Blasen laufend zu.

Die Größe der Blasen ist durch den Kennbuchstaben g und eine Kennzahl festgelegt. Der Kennwert g1 bezeichnet Blasen, die gerade noch mit freiem Auge zu erkennen sind. Als maximale Größe ist der Kennwert g5 vorgesehen. Die Festlegung der Kennbuchstaben und Kennzahlen wurde durch Vergleich zwischen der Probe und den in DIN 53 209 /7/ wiedergegebenen Abbildungen vorgenommen.

- Unterwanderung, Unterrostung

Vor den einzelnen Beanspruchungen wurden die Proben auf einer Seite gemäß DIN 53 167 /7/ mit einer Ritzspur (Ritzstichel Typ Sikkens) bis auf den metallischen Untergrund versehen, um nach den Beanspruchungen eine etwaige Unterwanderung bzw. Unterrostung festzustellen. Entsprechend dieser Norm werden diese Größen nach folgender Formel errechnet:

$$w_d = \frac{d - d_0}{2}$$

Hierin bedeuten:

- W_d = Unterwanderung bzw. Unterrostung in mm
 d = Gesamtbreite der unterwanderten bzw. unterrosteten Zone
(arithmetischer Mittelwert) in mm
 d_0 = Breite der ursprünglichen Ritzspur in mm.

Als Unterwanderung ist das von der Verletzungsstelle der Beschichtung ausgehende Eindringen des Korrosionsmediums in die Grenzflächen zwischen Anstrich und Stahlblechuntergrund zu verstehen. Sie verringert die Haftung des Anstriches und dient als Maß für dessen Widerstandsfähigkeit.

Die Unterrostung kennzeichnet den von der Verletzungsstelle ausgehenden Korrosionsangriff am Stahlblech unter dem Anstrich.

Beide Größen wurden nach dem Abbeizen der Beschichtung mit einem herkömmlichen Abbeizmittel und anschließender Reinigung des Stahlblechuntergrundes bestimmt.

- Korrosionstiefe

Im Bereich der Lackbeschädigung wurde die maximale Korrosionstiefe im Stahlblech, gemessen von der ursprünglichen Metalloberfläche aus, bestimmt. Dies erfolgt durch Aufnahme von Oberflächendiagrammen (Meßgerät der Fa. Feinprüf GmbH) bzw. mit Hilfe metallographischer Schliffbilder.

5.3.2 Unbeschichtete Proben

Entsprechend dem Verfahren bei den lackbeschichteten Proben wurden auch diese Proben nach ihrer Entnahme zunächst gereinigt. Zusätzlich erfolgte eine Entfernung der Korrosionsprodukte gemäß ASTM-Norm G 1-81 /26/ in der sog. Clark-Lösung (Zusammensetzung: 1 l 37%ige HCl, 20 g Sb_2O_3 , 50 g $SnCl_2$). Dabei wurden die Proben bei Raumtemperatur in diese Lösung im Ultraschallbad eingehängt, nach ca. 4 Minuten entnommen, in Spiritus getaucht, mit Warmluft vorgetrocknet und bis zur Gewichtskonstanz in einem evakuierten Exsikator gelagert.

Nach dieser Probenvorbehandlung erfolgte die Bestimmung von

- Korrosionsart und Ausmaß

Dabei wurden die für metallische Werkstoffe üblichen Prüfverfahren und Begriffe für chemische Korrosionsuntersuchungen (z.B. DIN 50 900, 50 905 /7/ angewendet. So wurde durch die Aufnahme von Oberflächendigrammen die Anfertigung von metallographischen Schlibfbildern und gravimetrisch die Art (gleichmäßige Flächenkorrosion, Loch-/Muldenkorrosion) und das Ausmaß der Korrosionserscheinungen gemessen. Spaltkorrosion wurde an den aus zwei verschraubten Probenhälften bestehenden Sandwichproben bestimmt. Dies erfolgte im Bereich von Spaltbreiten zwischen 0 bis 1,5 mm. An den längsgeschweißten Blechproben wurde untersucht, ob eine gegenüber dem ungestörten Blech verstärkte Korrosion im Schweißnahtbereich (d.h. in der Wärmeeinflußzone) auftritt.

6. Diskussion der Versuchsergebnisse

In den Tabellen 5 - 10 zu vorliegendem Berichtsteil sind sämtliche bisher gewonnenen Versuchsergebnisse mit Darstellung der diskutierten Meßgrößen zusammengefaßt. Als Ergänzung hierzu ist die makroskopische Abbildung der Proben nach Entnahme aus den Korrosionsmedien nach ca. 1 Jahr Versuchszeit zu verstehen (Fig. 4 - 13). Damit wurde versucht, einen möglichst umfassenden Gesamtüberblick über die Versuchsergebnisse zu geben, so daß im weiteren Berichtsteil nur die wesentlichen Punkte, die für einen Abfallbehälter von Bedeutung sind, diskutiert werden.

6.1 Behälterinnenseite

Eine Zusammenstellung der bezüglich der Korrosion an der Behälterinnenseite gewonnenen Untersuchungsergebnisse findet sich in den Tabellen 5, 6 (Fig. 4, 5) für die beschichteten Proben und in Tabelle 9 (Fig. 6 - 8) für die unbeschichteten Proben. Dabei basieren die Ergebnisse für die Abfallproduktsimulate auf einer ersten Probenahme nach 115 bzw. 244 Tagen und auf einer zweiten Probenahme nach 371 bzw. 531 Tagen. Wie diskutiert,

wurden die unterschiedlichen Temperaturen bei der Zwischenlagerung und der Endlagerung berücksichtigt. Weiterhin ist hervorzuheben, daß es sinnvoll war, eine deutliche Trennung vorzunehmen zwischen den Korrosionsvorgängen, die im Kontaktbereich zum Abfallprodukt hin stattfinden und denjenigen, die im Kontaktbereich zum darüberliegenden Dampfraum (z.B. Behälterdeckel) bzw. direkt im Übergangsbereich auftreten (halb eingetauchte Proben).

Entsprechend der Auslegung der Versuche und für eine einfachere Darstellung der Ergebnisse werden im folgenden die an der Innenseite eines Abfallbehälters möglichen Ausgangszustände "unbeschädigte Beschichtung", "Beschichtung mit kleinen Lackbeschädigungen (Lackrisse)" und "Behälter mit großflächigen Lackbeschädigungen (unbeschichteter Werkstoff)" und die daraus sich ergebenden Folgen für die Korrosion getrennt diskutiert.

Unbeschädigte Beschichtung

Für den Fall der mit dem Epoxidharzsystem GW 97/82-1 beschichteten Proben zeigt Fig. 4 (Spalte (1) und (4) sowie Tab. 5, daß im Kontaktbereich zwischen Produkt und unbeschädigter Beschichtung unter Zwischenlagerbedingungen ($T = 22^{\circ}\text{C}$) im Untersuchungszeitraum kein Korrosionsangriff festgestellt werden konnte. Lediglich unter Endlagerbedingungen bei einer Temperatur von $T = 50^{\circ}\text{C}$ zeigt sich nach ca. 1 Jahr eine Schädigung der Beschichtung durch Blasenbildung und für PZ-Lösung mit NaNO_3 auch geringfügige Korrosion unter der Beschichtung (Fig. 4). Ursache hierfür ist der Anstieg der Wasserdampfdurchlässigkeit mit der Temperatur. Dies wird auch durch das Ergebnis unter Schwitzwasserkonstantklima ($T = 40^{\circ}\text{C}$) bestätigt.

Gleiches gilt auch für das Polyurethansystem GW 97/82-2 (Tab. 6, Fig. 5). Jedoch ist hier die Blasenbildung unter Endlagerbedingungen deutlich stärker.

Beschichtung mit kleinen Lackbeschädigungen (Lackrisse)

Im Bereich von bis auf den Blechwerkstoff durchgehenden Lackbeschädigungen zeigen sich hingegen in allen Fällen Korrosionserscheinungen am Behältermaterial (Tab. 5, 6, Fig. 4, 5). So findet ausgehend von der Lack-

beschädigung eine Unterwanderung des Beschichtungssystems durch die Korrosionslösung statt. Im allgemeinen hat dies zusätzlich eine (... wenn auch geringere) Unterrostung des Beschichtungssystems zur Folge. Im Bereich des freiliegenden Behälterwerkstoffs tritt dann ein Abtrag des Grundmaterials auf, der gemäß Kap. 5.3.1 bestimmt wurde. Wie Tab. 5, 6 zeigt, ist dieser Vorgang unter Zwischenlagerbedingungen deutlich niedriger als unter Endlagerbedingungen und in den PZ-Lösungen weniger ausgeprägt als im Bentonit-Zement-Produkt.

Im Falle des Epoxidharz-Beschichtungssystems tritt unter der Belastung durch NaNO_3 -beladene PZ-Lösung bei 50°C nach ca. 1 Jahr eine ganzflächige Unterwanderung/Unterrostung auf. Bei niedrigerer Temperatur und in den anderen Korrosionsmedien bleibt ein Angriff im Grundwerkstoff im Versuchszeitraum auf die unmittelbare Beschädigungsstelle begrenzt (Fig. 4, Spalte 3, 4).

Beim Polyurethan-Beschichtungssystem hingegen zeigt sich immer eine ausgedehntere Unterwanderung/Unterrostung. So tritt hier bei 50°C nicht nur in der NaNO_3 -beladenen, sondern auch in der reinen PZ-Lösung eine ganzflächige Unterrostung des Beschichtungssystems auf (Fig. 5, Spalte 3, 4). Seine Rückhaltewirkung für die zwischen Beschichtungssystem und Grundwerkstoff eindringende Korrosionslösung ist damit deutlich schlechter.

Zusammen mit dem Ergebnis für die unbeschädigte Beschichtung kann damit gefolgert werden, daß das Epoxidharzsystem für die Behälterinnenseite einen besseren Korrosionsschutz darstellt als das Polyurethansystem.

Behälter mit großflächigen Lackbeschädigungen (unbeschichteter Werkstoff)

Die Untersuchungen an unbeschichteten Stahlblechen (Tab. 9, Fig. 6 - 8) zeigen, daß bei Kontakt des Werkstoffs mit Zementlösungen bzw. einem Bentonit/Zement-Produkt nahezu kein Korrosionsangriff festgestellt werden konnte. Außer einer gleichmäßigen Flächenkorrosion mit einer mittleren Dickenabnahme $< 2 \mu\text{m}$ in einem Jahr war keine Veränderung festzustellen. Dies ist auf die Passivierung der Metalloberfläche im stark alkalischen Bereich zurückzuführen. Lediglich die verschraubten Sandwichproben (Fig.7) zeigten Spaltkorrosionserscheinungen im Produktbereich.

Im Übergangsbereich zwischen Abfallprodukt und darüberliegendem Dampfraum bzw. im Dampfraum selbst zeigt sich hingegen eine deutliche Loch-/Muldenkorrosion, die hier im ungünstigsten Fall eine Korrosionstiefe von ca. 1200 μm nach 115 Tagen Probenlagerung in PZ-Lösung bei 22°C erreicht hat (Tab. 9). Im allgemeinen lag die im Dampfraum ermittelte Loch-/Muldentiefe im Stahlblech über den verwendeten Zementprodukten nach 1 Jahr bei maximal ca. 800 μm .

An den längsgeschweißten Stahlblechproben (Fig. 8) wurde weder in den PZ-Lösungen noch unter erhöhter Wasserdampfeinwirkung eine verstärkte Korrosion im Schweißnahtbereich (Wärmeeinflußzone) festgestellt.

Man ersieht daraus, daß großflächige Lackbeschädigungen an der Innenseite eines Abfallbehälters im Bereich des Freiraums über Zementprodukten oder am Behälterdeckel zu verstärkter Loch-/Muldenkorrosion führen. Aus diesem Grunde ist eine intakte Beschichtung bzw. durch vollständige Behälterverfüllung eine Vermeidung der korrosiven Wasserdampf-atmosphäre anzustreben.

6.2 Korrosion an der Behälteraußenseite

Die Untersuchungsergebnisse für die Behälteraußenkorrosion sind in den Tabellen 7, 8 (Fig. 9, 10) für die beschichteten Proben und in Tabelle 10 (Fig. 11 - 14) für die unbeschichteten Proben zusammengestellt. Wie im vorangegangenen Kapitel so werden auch hier die unterschiedlichen auf den Beschädigungsgrad der Beschichtung bezogenen Ausgangszustände betrachtet.

Unbeschädigte Beschichtung

Für den Fall einer unbeschädigten Außenbeschichtung zeigen die Daten (Tab. 7, 8), daß sowohl unter Zwischenlagerbedingungen als auch unter allen hier gewählten Endlagerbedingungen (Salzstock, Eisenerzbergerk Konrad) kein Korrosionsangriff bzw. keine Veränderung bei den Beschichtungen festgestellt werden konnte. Ein Unterschied zwischen Epoxid- und Polyurethansystem war nicht festzustellen.

Beschichtung mit kleinen Lackbeschädigungen (Lackrisse)

Bei Vorliegen einer kleinen Beschädigungsstelle im Epoxid-System war unter Zwischenlagerbedingungen und für saline Endlagerbedingungen (Normalfall) auch nach mehr als 1 Jahr im geschädigten Bereich keine Veränderung festzustellen (Tab. 7). Dies war jedoch in deutlichem Maße der Fall bei Kontakt der Proben mit feuchtem Eisenerz unter den diskutierten feuchtwarmen Verhältnissen in einer versiegelten Konradstrecke. Hier trat eine auf den unmittelbaren Beschädigungsbereich begrenzte Unterrostung des Epoxidharzsystems mit maximal 400 μm Korrosionstiefe im Blechwerkstoff nach 1 Jahr auf. Bei den Salzlösungen Q-Lösung und Konrad-Wasser war die Korrosionstiefe im Beschädigungsbereich geringer. Weiterhin war hier eine Unterrostung/Unterwanderung auch nach 1 Jahr nicht festzustellen (Fig. 9).

Beim Polyurethansystem ergab sich ein ähnliches Verhalten (Tab. 8). Nur trat hier zusätzlich im Konrad-Wasser eine Unterrostung/Unterwanderung mit Muldenkorrosion im Beschädigungsbereich auf (Fig. 10).

Damit bestätigt sich auch hier die zuvor für die Behälterinnenseite gemachte Aussage, wonach das Epoxidharzsystem die besser korrosionsbeständige Behälterbeschichtung ist.

Behälter mit großflächigen Lackbeschädigungen (unbeschichteter Werkstoff)

Betrachtet man die Versuchsergebnisse für unbeschichtete Stahlblechproben in Tab. 10 (Fig. 11 - 13), so stellt man fest, daß auch hier die Bedingungen in der feuchten Konradstrecke den größten Korrosionsangriff bewirkten. Dem flächenmäßigen Korrosionsangriff war eine Loch-/Muldenkorrosion überlagert, die mit Angriffstiefen von ca. 750 μm in einem Jahr zu örtlichen Durchrostungen der 1,5 mm dicken Blechproben geführt hat (Fig. 11). Weiterhin wurde Spaltkorrosion sowie verstärkte Korrosion in der Wärmeeinflußzone der Schweißnaht (Fig. 14) festgestellt. Demgegenüber ist der Korrosionsangriff im Zwischenlager oder in den Salzlösungen, der in Form einer gleichmäßigen Flächenkorrosion auftrat, gering. Ganz zu vernachlässigen, da unter der Nachweisgrenze, ist die Korrosion unter trockenen salinaren Endlagerbedingungen.

Damit verdeutlichen die Versuchsergebnisse, daß großflächige Lackbeschädigungen besonders unter Konrad-Bedingungen zu starker Behälterkorrosion führen. Wie in Kap. 4.2 dargestellt, treten diese stark korrosionsfördernden Bedingungen jedoch erst einige Zeit nach Versiegelung einer Lagerstrecke auf. Hingegen sind während des Einlagerungszeitraums, bei Bewitterung der Strecke, vernachlässigbar kleine Korrosionsauswirkungen zu erwarten, die vergleichbar denen unter trockenen Salinarbedingungen sind. Dies haben Korrosionsuntersuchungen an Sphäroguß GGG 40.3 ergeben /8/.

6.3 Extrapolation über den Versuchszeitraum hinaus

In der vorangegangenen Diskussion der Ergebnisse wurde gezeigt, daß das Epoxidharzsystem einen besseren Korrosionsschutz darstellt als das um den Faktor ca. 3 dicker aufgetragene Polyurethansystem. Da derzeit ohnehin nur epoxidharzbeschichtete Behälter verwendet werden, wird im folgenden ausschließlich dieses System zugrunde gelegt.

Die Untersuchungen waren so angelegt, daß der zeitliche Korrosionsfortgang ermittelt wurde, wenn auch nur in dem engen Zeitraum von einem Jahr. Eine Extrapolation der Ergebnisse auf längere Zeiten ist deshalb nur unter Einschränkungen möglich. So ist sie auch nur für die Fälle durchführbar, wo im Versuchszeitraum überhaupt ein Korrosionsvorgang stattgefunden hat. Vorgänge, die aufgrund einer längeren Inkubationszeit erst später einsetzen, werden dabei nicht erfaßt. Nicht betrachtet werden weiterhin mechanische Druckbelastungen (z.B. hervorgerufen durch Gebirgskonvergenz), die ein Versagen der Behälter bewirken können.

Wie vorliegende Ergebnisse gezeigt haben, war für einen innen und außen vollständig epoxidharzbeschichteten Behälter, der keinerlei Lackbeschädigungen aufweist, im Untersuchungszeitraum keine Korrosion nachzuweisen. Obwohl bei Endlagertemperaturen an der Behälterinnenseite gegenüber Zementlösung mit Natriumnitrat nach ca. 1 Jahr eine Blasenbildung aufgetreten ist, so zeigt doch das Ergebnis für unbeschichtetes Blech in diesem Medium, daß aufgrund der Passivierung der Metalloberfläche ein Materialabtrag im Blechwerkstoff nicht zu erwarten ist. Desweiteren haben frühere Untersuchungen /8/ an epoxidharzbeschichteten Stahlblechfässern, die 13 Jahre u.a. in einer gesättigten Salzlösung im Salzbergwerk Asse lagerten,

gezeigt, daß an den Stellen, wo das Beschichtungssystem nicht beschädigt war, keine Korrosion festgestellt werden konnte. Damit lassen die bisherigen Untersuchungen, die einen nicht lackbeschädigten Stahlblechbehälter und die Verwendung des beschriebenen Epoxidharzsystems voraussetzen, ein Korrosionsversagen nicht erwarten für einen Zeitraum der Zwischenlagerung von ca. 20 Jahren und auch für die ersten Jahre der Endlagerung.

Demgegenüber traten bei den Untersuchungen für einen Behälter mit Lackbeschädigungen im Versuchszeitraum Korrosionserscheinungen im Behälterwerkstoff auf. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Korrosion ist damit eine modellmäßige Extrapolation auf längere Zeiten möglich. Dabei wurde jedoch vorausgesetzt, daß keine Veränderung gegenüber dem bestimmten Korrosionsmechanismus bzw. dem zeitlichen Korrosionsfortgang, z.B. durch vollständigen Verbrauch von Sauerstoff, auftritt.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, ist unter Zwischen- und salinaren Endlagerbedingungen die bei einer defekten Beschichtung aufgetretene Außenkorrosion zu vernachlässigen gegenüber einer möglichen Innenkorrosion im Dampfraum über Zementprodukten. Setzt man dort eine größere Lackbeschädigung (unbeschichteter Bereich) voraus, so wäre eine erste, auf Teile des Beschädigungsbereichs begrenzte Durchrostung eines Produkt-Stahlblechcontainers mit 3 mm Wandstärke schon nach weniger als 10 Jahren möglich.

Der größte Korrosionsangriff tritt auf bei innen und außen gegenüberliegenden Lackbeschädigungen für eine Behälterlagerung im Eisenerzbergwerk Konrad. Dabei wird vorausgesetzt, daß beide Beschädigungsstellen im Bereich über dem Zementprodukt liegen (Wasserdampfklima). Für diesen Fall zeigt Fig. 15 die gemessenen Korrosionsraten bzw. den daraus extrapolierten Korrosionsverlauf an der Innen- und der Außenseite eines Produkt-Stahlblechcontainers (3 mm Wandstärke) als Funktion der Lagerzeit in einer unbewetterten Konradstrecke auf der -1250 m-Sohle.

Entsprechend den experimentellen Ergebnissen ist für die Außenkorrosion eine mittlere Dickenabnahme (gleichmäßige Flächenkorrosion) und für die Innenkorrosion die Muldentiefe (Loch-/Muldenkorrosion) im Beschädigungsbereich aufgetragen. Hierbei wurde angenommen, daß der Angriff an der In-

nenseite erst zum Zeitpunkt der Versiegelung der Lagerstrecke einsetzt (keine Zwischenlagerzeit). Als maximale Dickenabnahme ist die Behälterwandstärke von 3000 μm vorgegeben.

Für die an der gegenüberliegenden Blechseite ansetzende Außenkorrosion (Fig. 15) treten die hier zugrunde gelegten, stark korrosionsfördernden Bedingungen (42°C, 82% rel. Luftfeuchte, feuchter Erzversatz), wie in Kap. 4.2 diskutiert, erst ca. 1,5 Jahre nach Versiegelung der Lagerstrecke auf. Deshalb setzt die Außenkorrosion um diese Zeitspanne verspätet ein. Der Schnittpunkt beider Kurven bei ca. 5,6 Jahren gibt den Zeitpunkt des Auftretens erster Durchrostungen. Nach ca. 9,3 Jahren ist die mittlere Dickenabnahme durch die Außenkorrosion gleich der gesamten Behälterwandstärke (Fig. 15). Das bedeutet, daß ab diesem Zeitpunkt Durchrostungen im Bereich aller äußerer Lackbeschädigungen auftreten.

Zur Relativierung dieser nur bei Beschädigungen des Beschichtungssystems auftretenden Korrosionsvorgänge ist jedoch festzuhalten, daß hier die wesentlichen Korrosionsvorgänge erst nach Versiegelung einer Konrad-Lagerstrecke einsetzen. Dann wird jedoch ein Damm als Abschlußbauwerk für die Lagerstrecke eine zusätzliche Barriere für eine Radionuklidfreisetzung darstellen. Bei den bisher durchgeführten Langzeit-Sicherheitsbetrachtungen für Konrad /24/ wird kein Kredit von der Barrierenwirkung der Verpackung genommen. Die während der Zwischenlagerung, dem Transport und der Einlagerungsphase im Endlager geforderte Behälterintegrität ist somit ab dem Zeitpunkt der Streckenversiegelung nicht mehr erforderlich. Es ist weiterhin davon auszugehen, daß die hier diskutierten Behälter aufgrund der erst danach einsetzenden Druckbelastung durch die Gebirgskonvergenz mechanisch zerstört werden (Kriechverformung bis zum Bruch). Die hier beschriebenen Versuchsergebnisse verdeutlichen damit, daß die korrosionsseitige Auslegung der Stahlblechbehälter den Anforderungen voll genügt.

7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die mit dem Ziel einer Bewertung des Korrosionsverhaltens innen und außen lackbeschichteter Normalstahlbehälter durchgeführten Untersuchungen sind wie folgt zusammenzufassen:

Es wurde gezeigt, daß der Korrosionsangriff sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite der Behälter gleichzeitig stattfinden kann. Unter Berücksichtigung aller Gesichtspunkte zeigt ein 150 µm Epoxidharzsystem deutlich bessere Korrosionsschutzeigenschaften als ein 500 µm dickes Polyurethansystem. Das untersuchte Epoxidharzsystem wird derzeit als Korrosionsschutz für die im KfK eingesetzten Stahlblechbehälter verwendet.

Für einen epoxidharzbeschichteten Stahlblechbehälter ohne Lackbeschädigung konnte bei den Untersuchungen (Dauer ca. 1 Jahr) keine Korrosion bzw. kein Angriff im Grundwerkstoff festgestellt werden. Die vorliegenden Ergebnisse lassen eine Standzeit für diesen Fall erwarten, die eine Zwischenlagerung über 20 Jahre, den Transport und daran anschließend etliche Jahre der Endlagerung auch nach Versiegelung einer Einlagerungsstrecke überdeckt.

Treten hingegen durch unsachgemäße Handhabung der Behälter durchgreifende Beschädigungen des Beschichtungssystems auf, so ist mit einem Korrosionsangriff zu rechnen.

Eine größere Beschädigung des Beschichtungssystems (unbeschichteter Bereich) an der Innenseite eines mit Zementprodukten nicht vollständig befüllten Behälters führt im Bereich des Dampfraums über dem Produkt (z.B. Deckelinnenseite) bzw. an der Phasengrenze zu deutlicher Loch-/Muldenkorrosion (gemessene Korrosionstiefe bis zu ca. 1 mm in einem Jahr). Befindet sich jedoch die Beschädigungsstelle im Produktbereich, so ist aufgrund der Passivierung der Metalloberfläche der Angriff vernachlässigbar. Die hier aufgetretene Neigung zur Spaltkorrosion ist durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden. Daraus ersieht man, daß eine vollständige, beschädigungsfreie Beschichtung anzustreben ist.

Bei einer gegenüberliegenden Beschädigungsstelle an der Behälteraußenseite ist der zumeist flächenartige Materialabtrag bei der Außenkorrosion unter Zwischenlagerbedingungen, Salz-Endlagerbedingungen (trockenes Steinsalz, Q-Lösung) sowie unter den Lagerbedingungen in bewetterten Konradstrecken zu vernachlässigen. Der insgesamt größte Korrosionsangriff wurde für eine großflächige Lackbeschädigung unter Konrad-Bedingungen in

einer unbewetterten, vom übrigen Grubengebäude getrennten Strecke gemessen. Hier kann eine alleinige äußere Lackbeschädigung in weniger als 10 Jahren zur Durchrostung eines Stahlblechcontainers mit anfangs 3 mm Wandstärke führen.

Damit zeigen die Untersuchungen, intakte Innenbeschichtung vorausgesetzt (wovon allgemein ausgegangen werden kann), daß die spezifikationsgerecht beschichteten Normalstahlbehälter gerade dann die höchste Korrosionsbeständigkeit aufweisen, wenn die Anforderungen am größten sind. Dies ist für die Zwischenlagerung, den Transport und für die Einlagerungsphase im Endlager, d.h. bis zur Versiegelung einer Lagerkammer, der Fall. Nach der Versiegelung durch ein Abschlußbauwerk (Damm) wird den hier diskutierten Behältern ohnehin keine Barrierenfunktion mehr zugeordnet.

Damit konnte gezeigt werden, daß die beschriebenen Normalstahlbehälter mit der Epoxid-Innen- und Außenbeschichtung die an sie gestellten Korrosionsanforderungen erfüllen.

Literaturverzeichnis

- /1/ W. Friehe, W. Schwenk
Entwicklungsarbeiten zum Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen
Der Stahlbau 50 (1981), S. 115 - 120
- /2/ W. Schwenk
Prinzipien der Korrosion und des Korrosionsschutzes in Meerwasser
Schiff u. Hafen / Kommandobrücke Heft 2 (1983), S. 9 - 14
- /3/ W. Stelzel
Über das Korrosionsverhalten von Stahl in sulfidfreiem Beton
Dissertation, TH München (1963)
- /4/ K.-A. Von Oeteren
Korrosionsschutz durch Beschichtungsstoffe
Band I u. II, Carl Hanser Verlag München Wien (1980)
- /5/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.)
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle
PTB-Bericht SE-16, Braunschweig (1987)
- /6/ H.P. Berg, P. Brennecke
Radioaktive Abfälle und Sicherheitsanalysen
Atom + Strom 32 (1986) Nr. 4, S. 131 - 137
- /7/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)
Deutsche Normen
Beuth Verlag GmbH, Berlin / Köln
- /8/ W. Hauser, E. Smailos, R. Köster
Long-term corrosion behaviour of metallic drums for low and medium level waste forms
Proc. of an Internat. Symp. on Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal, Utrecht, NL, June 21 - 25, 1982
IAEA, Wien (1983) S. 283 - 292

- /9/ W. Hauser in
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik
Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1981
Bericht KfK 3301, (Februar 1982) S. 28 - 29
- /10/ W. Bechthold, W. Hauser, P. Johnsen et al.
Kerntechnische Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens
"Eignungsprüfung der Schachanlage Konrad für die Endlagerung radio-
aktiver Abfälle"
Bericht KfK 3428, (März 1983)
- /11/ Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.)
Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB)
KfK, Karlsruhe (1985)
- /12/ Anforderungen an radioaktive Abfälle für das Endlager Konrad und
Produktkontrolle
Vorträge des 62. PTB-Seminars am 29.10.1985 in der PTB Braunschweig
PTB-Bericht SE-8, Braunschweig (1986)
- /13/ P. Brennecke, J. Schumacher
Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland
- Abfallerhebung für das Jahr 1986 -
PTB-Bericht SE-18, Braunschweig (1986)
- /14/ U. Pohl, W. Gramatte, W. Hauser et.al.
Konditionierung tritiumhaltiger Wässer für die Endlagerung in Groß-
containern
Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik 1986,
Aachen 8. - 10. April 1986
Deutsches Atomforum e.V., Bonn (1986) S. 297 - 300
- /15/ R. Köster, G. Rudolph
Verfahren zur Verfestigung von tritiumhaltigem Wasser
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Deutsches Patent DE 29 17 060 C 2 erteilt am 27.10.1983

- /16/ W. Kunz, E. Gelfort, K.H. Grünthaler et al.
Verfestigung tritiumhaltiger Wässer im technischen Maßstab zur Herstellung von Endlagergebinden (I)
Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik 1987,
Karlsruhe, 2. - 4. Juni 1987
Deutsches Atomforum e.V., Bonn (1987) S. 461-464
- /17/ R.E. Schmitt, W. Gramatte, G. Rudolph et al.
Verfestigung tritiumhaltiger Wässer im technischen Maßstab zur Herstellung von Endlagergebinden (II)
Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik 1987,
Karlsruhe, 2. - 4. Juni 1987
Deutsches Atomforum e.V., Bonn (1987) S. 465-468
- /18/ Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.)
Wie sicher ist die Entsorgung?
KfK, Karlsruhe (1982)
- /19/ H. Röthemeyer
Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland.
Jahrbuch der Atomwirtschaft 1985, S. A59 - A66, Düsseldorf (1985)
- /20/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (Hrsg.)
Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlußbericht Band I und II
Bericht GSF - T 136, (Juni 1982)
- /21/ H. Röthemeyer
Site investigations and conceptual design for the repository in the nuclear "Entsorgungszentrum" of the Federal Republic of Germany.
Proc. of a Symposium on Underground Disposal of Radioactive Wastes,
Otaniemi, Finland, July 2-6, 1979
IAEA, Wien (1980), Vol. I, S. 297 - 308

- /22/ P. Brennecke, E. Warnecke
Disposal of radioactive Wastes from nuclear power plants in the Federal Republic of Germany
Proc. of a Seminar on the Management of Radioactive Wastes from Nuclear Power Plants, Karlsruhe, October 5-9, 1981
IAEA-TECDOC-276, Wien (1983), S. 213-226
- /23/ N. Jockwer
Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle
Dissertation, Technische Universität Clausthal 1981
Bericht GSF-T 119 (Juni 1981)
- /24/ Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (Hrsg.)
Zusammenfassender Abschlußbericht
Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung Berlin GmbH,
Berlin, (Januar 1985)
- /25/ W. Hauser, R. Köster
Corrosion behaviour of nuclear cast iron casks for low and intermediate level wastes
Scientific Basis for Nuclear Waste Management:
Proceedings of the 9th International Symposium, Stockholm, September 9-11, 1985
Pittsburgh, Materials Research Society (1986), p. 437-444
- /26/ Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens Designation G 1 - 81
Annual Book of ASTM Standards (1984), Volume 03.02, p. 87 - 92

Abkürzungen

KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe
HDB	Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe
LAW	schwachradioaktive Abfälle
MAW	mittelradioaktive Abfälle
EPDM	Äthylen-Propylen-Terpolymer-Kautschuk (APTK)
W/Z	Wasser/Zement-Wert
LWR	Leichtwasserreaktor
HTO	Tritiumwasser

Tab. 1: Zusammenstellung der verwendeten Stahlblechwerkstoffe

Kurzname	Werkstoff-Nr.	Bezeichnung	Zusammensetzung in Gew. %						
			C	Si	Mn	P	S	N	
USt 12 03	1.0330	Stahlblech nach DIN 1541 zunderfrei, unberuhigt Euronorm 29-69 Werkstoffgüte nach DIN 1623	<0.10	Spuren	0.20-0.45	<0.035	<0.035	<0.007	
RSt 37 -2	1.0038	Stahlblech nach DIN 1542 beruhigt Euronorm 29-69 Werkstoffgüte nach DIN 17 100	0.17-0.20	0.03-0.30	0.20-0.50	<0.050	<0.050	<0.009	

Tab. 2: Aufbau des Beschichtungssystems GW 97/82-1

- Hersteller : Fa. Geholit und Wiemer, Lack- und Kunststoffchemie GmbH
Spöcker Str.2
D-7523 Graben-Neudorf
- Vorbehandlung des Metalluntergrunds :
Strahlentrostung mit Körnung SA 2½ nach DIN 55 928 Teil 4
- Beschichtungstyp :
dreischichtige Epoxidharzbeschichtung mit ca. 150 µm Trockenschichtdicke
- Beschichtungsaufbau :

interne Firmenbezeichnung	Beschichtungstyp	Schichtdicke	Farbe	qualitative Charakterisierung
GEHOPON-EX-Metalgrund E1-613	Grundierung	50 µm	grün	2-Komponenten Epoxid/Zink-Phosphat-Grundbeschichtung mit Füllstoffen
GEHOPON-EX-Haftgrund E1-940	1. Deckschicht	50 µm	weiß	2-Komponenten Epoxid/1. Deckbeschichtung mit den Pigmenten Titan-Dioxid und Magnesium-Silikat
GEHOPON-EX gelb E1-1248	2. Deckschicht	50 µm	gelb ca. RAL 1004	2-Komponenten Epoxid/2. Deckbeschichtung mit organischen Pigmenten und Füllstoffen

Tab. 3: Aufbau des Beschichtungssystems GW 97/82-2

- Hersteller : Fa. Geholit und Wiemer, Lack- und Kunststoffchemie GmbH
 Spöcker Str.2
 D-7523 Graben-Neudorf

- Vorbehandlung des Metalluntergrunds :
 Strahlentrostung mit Körnung SA 2½ nach DIN 55 928 Teil 4

- Beschichtungstyp :
 Zweischichtige Polyurethanbeschichtung mit ca. 500 µm Trockenschichtdicke

- Beschichtungsaufbau :

interne Firmenbezeichnung	Beschichtungstyp	Schichtdicke	Farbe	qualitative Charakterisierung
GEHOPON-E-lastic-Metalgrund braun, E18-801	Grundierung	250 µm	braun	2-Komponenten Epoxid/Polyurethan- Zinkphosphat-Grundbeschichtung mit Füllstoffen
GEHOPON-E-lastic-Beschichtung gelb, E18-1202	Deckschicht	250 µm	gelb ca. RAL 1004	2-Komponenten Epoxid/Polyurethan- Deckbeschichtung mit organischen Gelbpigmenten und Füllstoffen

Tab. 4: Zusammenstellung der Versuchsbedingungen zur Simulation der Behälterinnen- und Außenkorrosion

Abfallprodukte und Lagerbedingungen	Versuchsbedingungen	
	Temperaturen	Korrosionsmedien
* Zementabfallprodukt (Portland-Zement PZ 35F, Wasser/Zement-Wert=0.4)	22°C, 50°C	wässrige Lösung aus PZ 35F pH ~12, O ₂ -Gehalt ~6 mg/l
* NaNO ₃ -beladenes Zementabfallprodukt (PZ 35F, W/Z=0.4)	22°C, 50°C	wässrige Lösung aus PZ 35F mit 30 Gew.% NaNO ₃ pH ~11, O ₂ -Gehalt ~5 mg/l
* Tritiumwasser-Bentonit-Zementprodukt (Tixoton CV 15, Portlandzement PZ 35F)	22°C, 50°C	Referenzprodukt mit 16.7 Gew.% Tixoton CV 15 16.7 Gew.% PZ 35F 66.6 Gew.% Wasser
* erhöhte Wasserdampfeinwirkung (Schwitzwasser)	40°C	Schwitzwasserkonstantklima nach DIN 50 017, rel. Luftfeuchte ~100 %
<u>Zwischenlagerung :</u>		
* überdachtes Zwischenlager	gemittelt über ein Jahr ~9°C	in situ-Versuch im KfK-Lagerbereich, rel. Luftfeuchte ~80 %
<u>Endlagerung in einem Salzstock :</u>		
* bewetternete Lagerstrecke	30°C	in situ-Versuch auf der -775m Sohle der Schachtanlage Asse, Proben waren mit Salzgrus überdeckt, rel. Luftfeuchte ~30 %
* quaternäre Salzlösung (in Störfallscenarien postuliert)	50°C	gesättigte Salzlösung (1), pH ~5, O ₂ -Gehalt ~3 mg/l
<u>Endlagerung im Eisenerzbergwerk Konrad :</u>		
* unbewetternete Lagerstrecke	42°C	in situ-Versuch auf der -1250m Sohle der Schachtanlage Konrad, Proben waren im Kontakt mit Eisenerzgranulat, rel. Luftfeuchte ~80 %
* geologisches Tiefenwasser im Bergwerk Konrad	50°C	Tiefenwasser (2), O ₂ -Gehalt ~5 mg/l, pH ~6

(1) Quaternäre Salzlösung (Typ Q) :

Mg²⁺ 87 g/l, Na⁺ 7.6 g/l, K⁺ 24.3 g/l,
Cl⁻ 270.2 g/l, SO₄²⁻ 23.7 g/l

(2) Hauptkomponenten des geologischen Tiefenwassers aus dem Bergwerk Konrad :

Mg²⁺ 2.38 g/l, Na⁺ 64.5 g/l, Ca²⁺ 13.5 g/l,
Cl⁻ 130 g/l, SO₄²⁻ 0.73 g/l

Tab. 5: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit lackbeschichteten USt 12 03-Stahlblechproben (Epoxidharz-System GW 97/82-1)

- Ergebnisse für die Behälterinnenseite -

Korrosionsmedium	Lager-temp. (°C)	Lagerzeit (Tage)	unbeschädigte Beschichtung			beschädigte Beschichtung			Korrosionstiefe (µm)	
			Glanzverlust	Blasengrad DIN 53 209	Korrosion unter der Beschichtung	Unterveränderung DIN 53 167 (mm)	Unterrostung DIN 53 167 (mm)	Korrosion an Lackbeschädigung		
wässrige PZ 35F-Lösung :										
* Probe in Kontakt mit der Lösung	22	115	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	0	0	0	65
	22	371	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	0	0	0	60
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	115	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	<2	<2	<2	75
	22	371	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	<2	<2	<2	100
* Probe in Kontakt mit der Lösung	50	115	nein	m0/g0	nein	nein	0	0	0	150
	50	371	nein	m5/g2	nein	korr.pkte	15	9	9	275
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	nein	0	0	0	110
	50	371	nein	m5/g2	nein	korr.pkte	15	9	9	120
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	0	0	0	85
	50	371	nein	m5/g2	nein	korr.pkte	15	9	9	120
wässrige PZ 35F-Lösung mit Natriumnitrat :										
* Probe in Kontakt mit der Lösung	22	115	nein	m0/g0	nein	nein	<3	<2	<2	280
	22	371	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	<5	<4	<4	140
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	115	nein	m0/g0	nein	nein	0	0	0	200
	22	371	nein	m0/g0	nein	vereinzelte	0	0	0	155
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	ja	m0/g0	ja	vereinzelte	<4	<2	<2	100
	50	371	ja	m3/g4	ja	ja	ganzflächig	ganzflächig	ganzflächig	180
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	ja	0	0	0	130
	50	371	nein	m0/g0	nein	ja	<20	<12	<12	85
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	nein	0	0	0	120
	50	371	nein	m0/g0	nein	nein	<20	<12	<12	120

Tab. 5: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit lackbeschichteten USt 12 03-Stahlblechproben
(Epoxidharz-System GW 97/82-1)

- Ergebnisse für die Behälterinnenseite, Fortsetzung -

Korrosionsmedium	Lager- temp. (°C)	Lager- zeit (Tage)	unbeschädigte Beschichtung			beschädigte Beschichtung			Korrosions- tiefe (µm)
			Glanz- verlust	Blasengrad DIN 53 209	Korrosion unter der Beschichtung	Unterwanderung DIN 53 167 (mm)	Unterrostung DIN 53 167 (mm)	Korrosion an Lackbeschädigung	
Bentonit/Zement-Referenzprodukt :									
* Probe in Kontakt mit dem Produkt	22	244	ja	m0/g0	nein	<5	<1	0	
	22	531	ja	<m1/g1	nein	<3	0	0	
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	244	nein	m0/g0	nein	<5	<1	200	
	22	531	nein	<m1/g1	nein	<4	<1	100	
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	22	244	nein	m0/g0	nein	<0.5	<0.5	50	
	22	531	nein	<m1/g1	nein	0	0	0	
* Probe in Kontakt mit dem Produkt	50	244	ja	m0/g0	nein	<15	<12	400	
	50	531	ja	m2/g3	vereinzelte	<13	<2	400	
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	244	nein	m0/g0	nein	<15	<12	400	
	50	531	nein	m4/g4	vereinzelte	<13	<2	400	
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	244	nein	m3/g2	nein	<2	<2	100	
	50	531	nein	m2/g2	nein	0	0	0	
Schwitzwasserkonstant- Klima DIN 50 017	40	92	nein	m0/g0	vereinzelte	0	0	100	
	40	365	nein	m3/g2	vereinzelte	<2	<2	150	

Tab. 6: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit lackbeschichteten USt 12 03-Stahlblechproben (Polyurethan-System GW 97/82-2)

- Ergebnisse für die Behälterinnenseite -

Korrosionsmedium	Lager-temp. (°C)	Lagerzeit (Tage)	unbeschädigte Beschichtung		beschädigte Beschichtung		Korrosionstiefe (µm)
			Glanzverlust	Blasengrad	Korrosion unter der Beschichtung	Unterwanderung	
			DIN 53 209	DIN 53 209	DIN 53 167	DIN 53 167	(µm)
wässrige PZ 35F-Lösung :							
* Probe in Kontakt mit der Lösung	22	115	nein	m0/g0	vereinzelt	<4	100
	22	371	nein	m0/g0	vereinzelt	<5	70
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	115	nein	m0/g0	nein	0	80
	22	371	nein	m0/g0	vereinzelt	<5	100
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	22	115	nein	m0/g0	nein	<4	120
	22	371	nein	m0/g0	vereinzelt	<5	270
* Probe in Kontakt mit der Lösung	50	115	nein	m0/g0	ja	<2	0
	50	371	ja	m5/g5	ja	ganzflächig	250
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	0	0
	50	371	nein	m5/g5	ja	ganzflächig	100
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	vereinzelt	0	70
	50	371	nein	m5/g5	ja	ganzflächig	120
wässrige PZ 35F-Lösung mit Natriumnitrat :							
* Probe in Kontakt mit der Lösung	22	115	nein	m0/g0	nein	<10	0
	22	371	nein	m0/g0	nein	<11	150
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	115	nein	m0/g0	nein	0	0
	22	371	nein	m0/g0	nein	<11	325
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	22	115	nein	m0/g0	nein	0	110
	22	371	nein	m0/g0	nein	<11	250
* Probe in Kontakt mit der Lösung	50	115	ja	m5/g2	ja	ganzflächig	0
	50	371	ja	m5/g5	ja	ganzflächig	100
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	<8	0
	50	371	nein	m5/g5	ja	ganzflächig	120
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	nein	m0/g0	nein	<8	110
	50	371	nein	m0/g0	nein	<20	90
Schwitzwasserkonstantklima DIN 50 017	40	92	nein	m0/g0	ja	<2	110
	40	365	nein	m5/g3	ja	<3	160

Tab. 7: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit lackbeschichteten USt 12 03-Stahlblechproben
(Epoxidharz-System GW 97/82-1)

- Ergebnisse für die Behälteraußenseite -

Korrosionsmedium	Lager- temp. (°C)	Lager- zeit (Tage)	unbeschädigte Beschichtung			beschädigte Beschichtung			Korrosions- tiefe (µm)
			Glanz- verlust	Blasengrad DIN 53 209	Korrosion unter der Beschichtung	Unterwanderung DIN 53 167 (mm)	Unterrostung DIN 53 167 (mm)	Korrosion an Lackbeschädigung	
überdachter Freiraum im KfK-Zwischenlager	-10-30	104	nein	m0/g0	nein	0	0	0	0
	-10-30	364	nein	m0/g0	nein	0	0	0	0
trockener Salzgrus bewetete Strecke 775m Sohle,ASSE	32	155	nein	m0/g0	nein	0	0	0	0
	32	400	nein	m0/g0	nein	0	0	0	0
quinäre Salzlösung (Q-Lösung)	50	121	nein	m0/g0	nein	0	0	0	0
	50	381	nein	m0/g0	nein	0	0	0	100
feuchtes Eisenerzgranulat unbewetete Strecke 1250m Sohle, Konrad	42	133	nein	m0/g0	nein	<4	<2	170	170
	42	378	nein	m0/g0	nein	<17	<7	400	400
geologisches Wasser aus Konrad	50	121	nein	m0/g0	nein	0	0	0	0
	50	381	nein	m0/g0	nein	0	0	0	150

Tab. 8: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit lackbeschichteten USt 12 03-Stahlblechproben (Polyurethan-System GW 97/82-2)

- Ergebnisse für die Behälteraußenseite -

Korrosionsmedium	unbeschädigte Beschichtung				beschädigte Beschichtung			
	Lager- temp. (°C)	Lager- zeit (Tage)	Glanz- verlust	Blasengrad DIN 53 209	Korrosion unter der Beschichtung	Unterwanderung DIN 53 167 (mm)	Unterrostung DIN 53 167 (mm)	Korrosions- tiefe (µm)
überdachter Freiraum im KfK-Zwischenlager	-10-30	104	nein	m0/g0	nein	0	0	0
	-10-30	364	nein	m0/g0	nein	0	0	0
trockener Salzgrus bewetterte Strecke 775m Sohle,ASSE	32	155	nein	m0/g0	nein	0	0	0
	32	400	nein	m0/g0	nein	0	0	90
quinäre Salzlösung (Q-Lösung)	50	121	nein	m0/g0	nein	0	0	0
	50	381	nein	m0/g0	nein	0	0	150
feuchtes Eisenerzgranulat unbewetterte Strecke 1250m Sohle, Konrad	42	133	nein	m0/g0	nein	<3	<3	150
	42	378	nein	m0/g0	nein	<15	<5	210
geologisches Wasser aus Konrad	50	121	nein	m0/g0	nein	<25	<8	120
	50	381	nein	m0/g0	nein	<35	<25	415

Tab. 9: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit unbeschichteten Ust 12 03-Stahlblechproben

- Ergebnisse für die Behälterinnenseite -

Korrosionsmedium	Lager-temp. (°C)	Lagerzeit (Tage)	aufgetretene Korrosionsarten					mittlere Dickenabnahme (µm)	mittlere Abtragsrate (µm/a)
			Flächenkorrosion	Muldenkorrosion max. Korrtiefe	Lochkorrosion (µm)	Spaltkorrosion	verstärkte Korr. an Schweißnaht		
wässrige PZ 35F-Lösung :									
* Probe in Kontakt mit der Lösung	22	115	Ja	nein	nein	Ja	nein	<0.03	<0.1
	22	371	Ja	nein	nein	nein	nein	1.8	1.77
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	115	nein	1150	800	Ja	nein		
	22	371	nein	800		Ja	nein		
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	22	115	nein	590	700	nein	nein		
	22	371	nein	700		nein	nein		
* Probe in Kontakt mit der Lösung	50	115	Ja	130		Ja	nein	4.3	13.7
	50	371	Ja	nein	nein	Ja	nein	1.7	1.67
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	115	nein	400	600	Ja	nein		
	50	371	nein	600		Ja	nein		
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	Ja	nein		nein	nein		
	50	371	nein	450		nein	nein		
wässrige PZ 35F-Lösung mit Natriumnitrat :									
* Probe in Kontakt mit der Lösung	22	115	Ja	nein	nein	nein	nein	<0.03	<0.1
	22	371	Ja	nein	nein	nein	Ja	1.2	1.15
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22	115	Ja	nein	nein	nein	nein		
	22	371	Ja	nein	nein	nein	nein		
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	22	115	Ja	300	600	nein	nein		
	22	371	nein	600		nein	nein		
* Probe in Kontakt mit der Lösung	50	115	Ja	nein	200	nein	nein	<0.03	<0.1
	50	371	Ja	nein		nein	nein	6.4	6.3
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50	115	Ja	nein		nein	nein		
	50	371	Ja	nein		nein	nein		
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50	115	Ja	100		nein	nein		
	50	371	Ja	nein		nein	nein		

Tab. 9: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit unbeschichteten Ust 12 03-Stahlblechproben (bei Bentonit/Zement-Referenzprodukt : RSt 37 -2)

- Ergebnisse für die Behälterinnenseite, Fortsetzung -

Korrosionsmedium	Lager-temp. (°C)	Lagerzeit (Tage)	aufgetretene Korrosionsarten						mittlere Abtragsrate (µm/a)
			Flächenkorrosion	Muldenkorrosion max. Korr.tiefe (µm)	Lochkorrosion (µm)	Spaltkorrosion	verstärkte korr. an Schweißnaht	mittlere Dickenabnahme (µm)	
Bentonit/Zement-Referenzprodukt :									
* Probe in Kontakt mit dem Produkt	22 22	154 427	ja ja	nein nein	nein nein	nicht best. nicht best.	nicht best. nicht best.	<0.03	<0.1
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	22 22	154 427	nein nein	300 200		nicht best. nicht best.	nicht best. nicht best.		
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	22 22	154 427	nein nein	40 80		nicht best. nicht best.	nicht best. nicht best.		
* Probe in Kontakt mit dem Produkt	50 50	154 427	ja ja	nein nein	nein nein	nicht best. nicht best.	nicht best. nicht best.	<0.03	<0.1
* Probe im Übergangsbereich z. Dampfraum	50 50	154 427	nein nein	270 950		nicht best. nicht best.	nicht best. nicht best.		
* Probe in Kontakt mit dem Dampfraum	50 50	154 427	nein nein	100 100		nicht best. nicht best.	nicht best. nicht best.		
Schwitzwasserkonstantklima DIN 50 017	40 40	92 365	ja ja	140 260		ja ja	nein nein	31.1 44.5	123 44.5

Tab. 10: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit unbeschichteten USt 12 03-Stahlblechproben

Korrosionsmedium	Lager- temp. (°C)	Lager- zeit (Tage)	aufgetretene Korrosionsarten						mittlere Dicken- abnahme (µm)	mittlere Abtrags- rate (µm/a)
			Flächen- korrosion	Mulden- korrosion max. Korrtiefe	Loch- korrosion (µm)	Spalt- korrosion	verstärkte korr. an Schweißnaht			
überdachter Freiraum im KfK-Zwischenlager	-10-30	104	Ja	nein	120	nein	nein	nein	3.3	11.6
	-10-30	364	Ja	nein		nein	nein	nein	8.4	8.4
trockener Salzgrus bewetterte Strecke 775m Sohle,ASSE	32	155	Ja	nein		nein	nein	nein	<0.03	<0.1
	32	400	Ja	nein		nein	nein	nein	<0.03	<0.1
quinäre Salzlösung (Q-Lösung)	50	121	Ja	nein	140	nein	Ja	nein	10.9	32.9
	50	381	Ja	nein		nein	Ja	nein	24.2	23.2
feuchtes Eisenerzgranulat unbewetterte Steckle 1250m Sohle, Konrad	42	133	Ja		280		Ja	Ja	77.4	21.2
	42	378	nein		740		Ja	Ja	315.6	305
geologisches Wasser aus Konrad	50	121	Ja		120		Ja	nein	5.8	17.4
	50	381	Ja		130		Ja	nein	23.5	22.5



Fig. 1: Rollsicken-Abfallfaß
mit 200 l Nutzvolumen

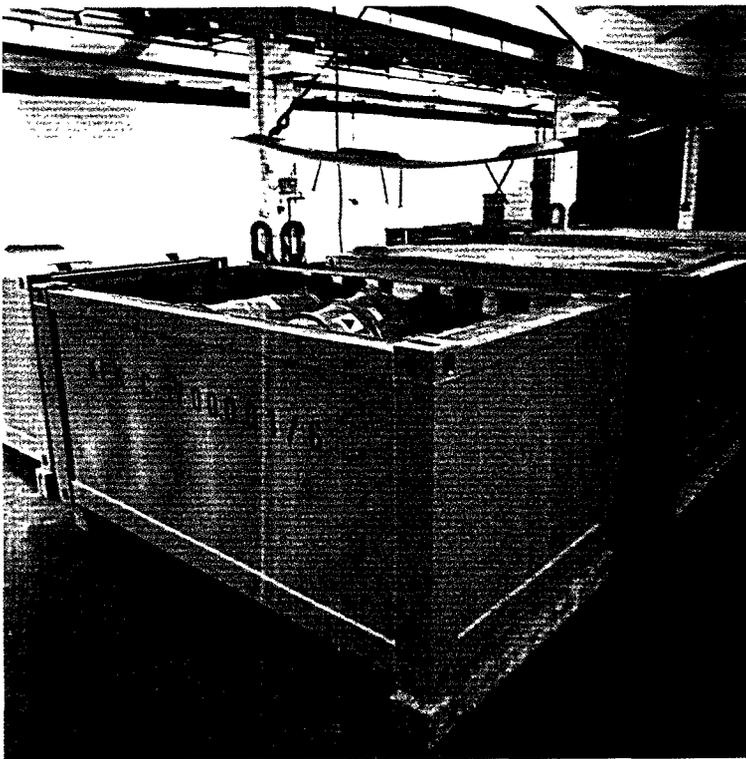
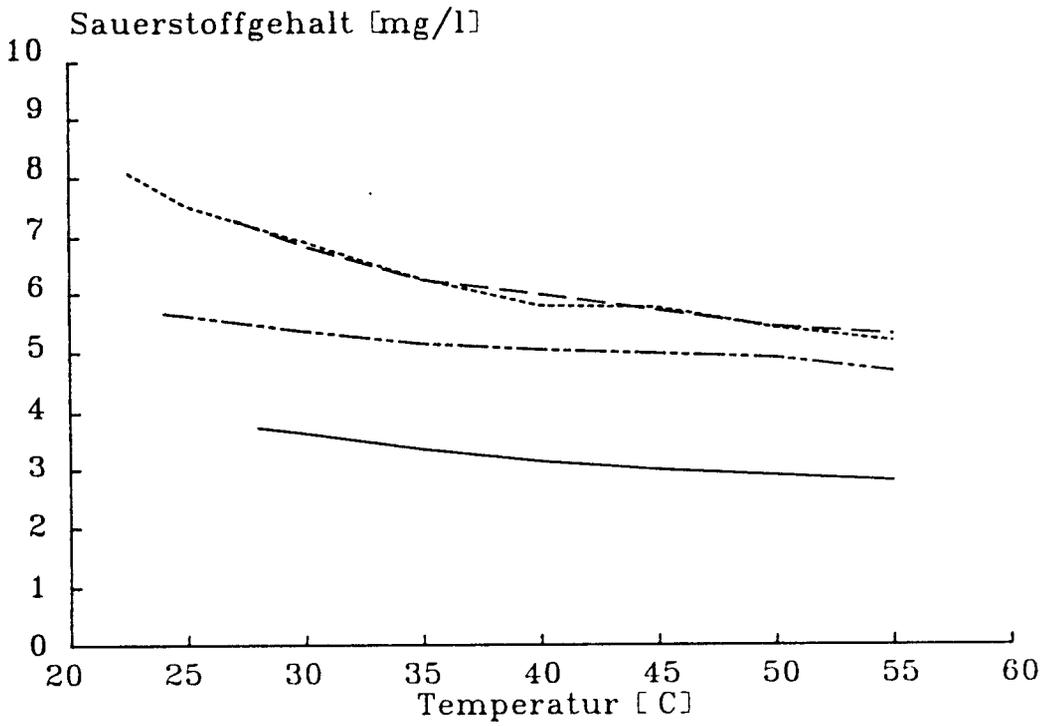


Fig. 2: Faß-Stahlblechcontainer
mit 200 l-Einsatzfässern



Q-Lösung Konradwasser PZ35F-Lösung PZ/NaNO3-Lsg

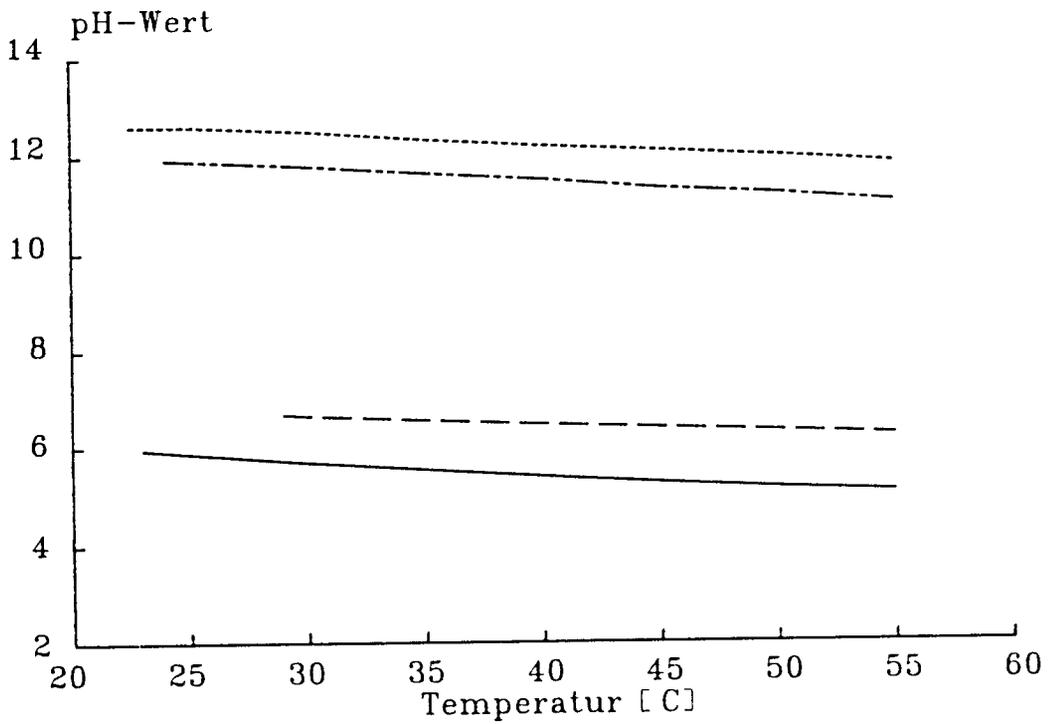


Fig. 3: Sättigungskonzentrationen von Luftsauerstoff und pH-Werte in wässrigen Korrosionslösungen

**Korrosionsmedium und
Lagertemperatur**

Ausgangszustand

**PZ 35 F-Zementlösung,
ca. 22°C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, ca. 22°C**

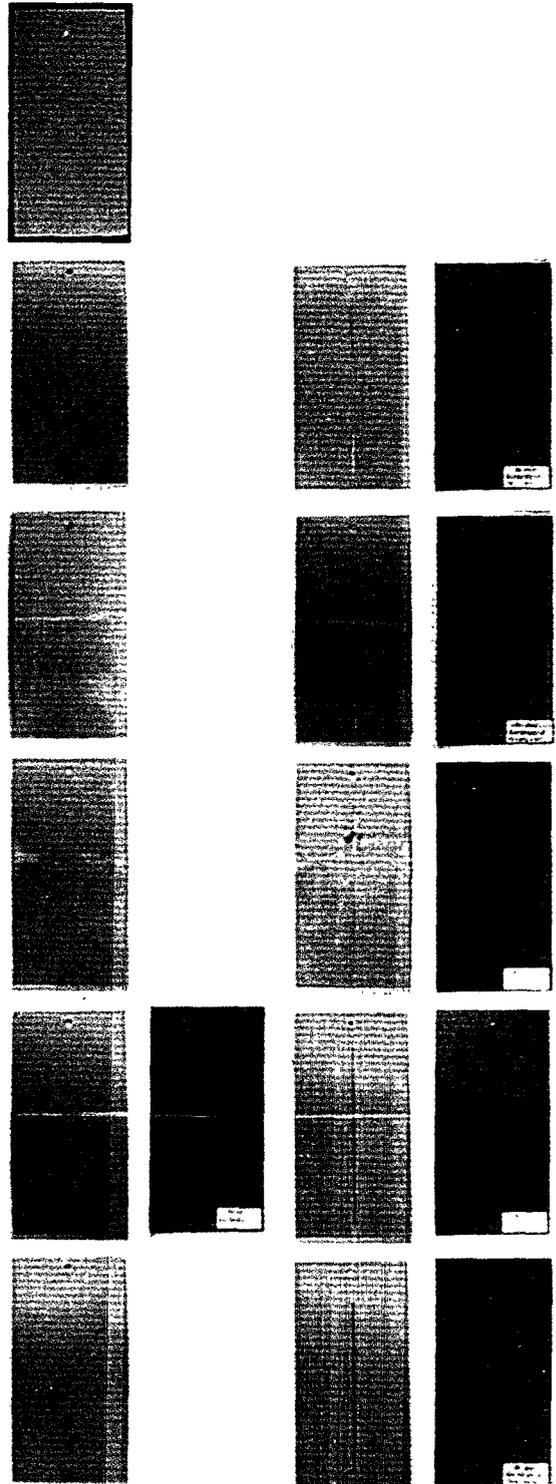
**PZ 35 F- Zementlösung,
50°C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, 50°C**

**Schwitzwasserkonstantklima
DIN 50 017, 40°C**

**Mit Epoxidharzsystem (150 µm)
beschichtete ebene Proben
(1,5 x 100 x 200 mm)**

(1) (2) (3) (4)



KIK

Fig. 4: Lackbeschichtete USt 1203-Proben nach 365 Tagen Innenbeanspruchung

- (1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
- (2) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Vorderseite
- (3) Probe nach der Beanspruchung / Rückseite mit Lackbeschädigung
- (4) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Rückseite mit Lackbeschädigung

Korrosionsmedium und Lagertemperatur

Ausgangszustand

PZ 35 F-Zementlösung, ca. 22°C

PZ 35 F-Zementlösung mit Na NO₃, ca. 22°C

PZ 35 F- Zementlösung, 50°C

PZ 35 F-Zementlösung mit Na NO₃, 50°C

Schwitzwasserkonstantklima DIN 50017, 40°C

Mit Polyurethansystem (500 µm) beschichtete ebene Proben (1,5 x 100 x 200 mm)

(1) (2) (3) (4)

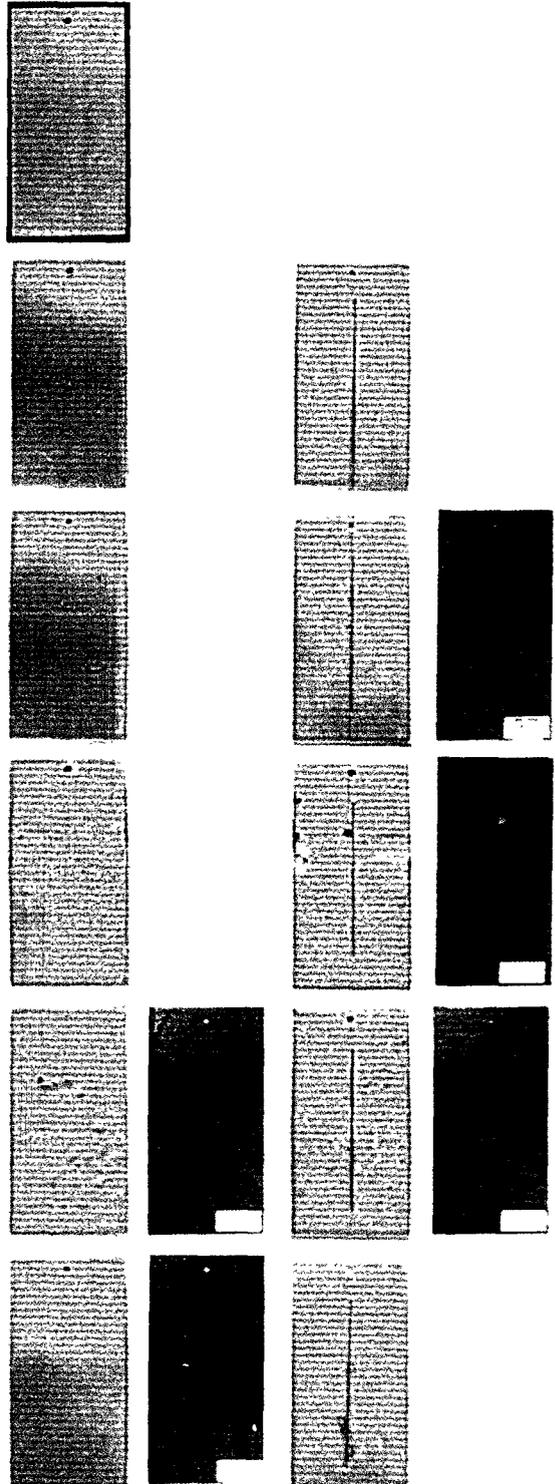


Fig. 5: Lackbeschichtete USt 1203-Proben nach 365 Tagen Innenbeanspruchung

- (1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
- (2) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Vorderseite
- (3) Probe nach der Beanspruchung / Rückseite mit Lackbeschädigung
- (4) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Rückseite mit Lackbeschädigung

**Korrosionsmedium und
Lagertemperatur**

Ausgangszustand

**PZ 35 F-Zementlösung,
ca. 22°C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, ca. 22°C**

**PZ 35 F-Zementlösung,
50°C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, 50°C**

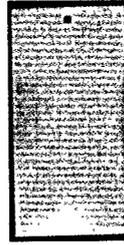
**Schwitzwasserkonstantklima
DIN 50 017, 40°C**

**Unbeschichtete ebene
Proben
(1,5 x 100 x 200 mm)**

(1)

(5)

(5)



KfK

Fig. 6: Ebene USt 1203-Proben nach 365 Tagen Innenbeanspruchung

(1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
(5) Probe nach Reinigung und Ablosen der Korrosionsprodukte

**Korrosionsmedium und
Lagertemperatur**

Ausgangszustand

**PZ 35 F-Zementlösung,
ca. 22 °C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, ca. 22 °C**

**PZ 35 F- Zementlösung,
50 °C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, 50 °C**

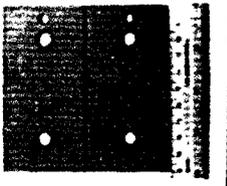
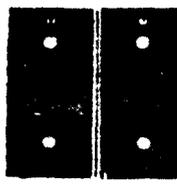
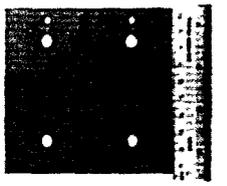
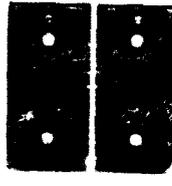
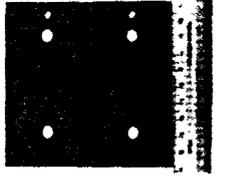
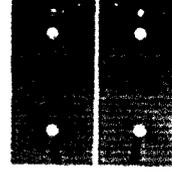
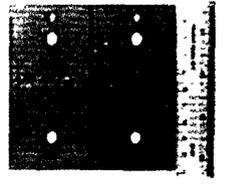
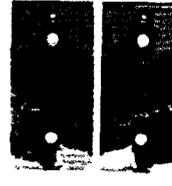
**Schwitzwasserkonstantklima
DIN 50017, 40 °C**

**Unbeschichtete verschraubte
Spaltproben
(1,5 x 50 x 100 mm)**

(1)

(6)

(7)



kfk

Fig. 7: USt 1203-Spaltproben nach 365 Tagen Innenbeanspruchung

- (1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
- (6) Probe nach der Beanspruchung / Innenseiten
- (7) wie (6) jedoch nach Reinigung und Ablosen der Korrosionsprodukte

**Korrosionsmedium und
Lagertemperatur**

Ausgangszustand

**PZ 35 F-Zementlösung,
ca. 22°C**

**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, ca. 22°C**

**PZ 35 F-Zementlösung,
50°C**

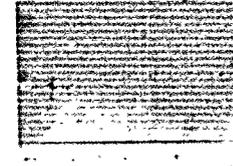
**PZ 35 F-Zementlösung
mit Na NO₃, 50°C**

**Schwitzwasserkonstantklima
DIN 50 017, 40°C**

**Unbeschichtete ge-
bogene Schweißproben
(1,5x100x200 mm)**

(1)

(5)



kfk

Fig. 8: Geschweißte USt 1203-Proben nach 365 Tagen Innenbeanspruchung

(1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
(5) Probe nach Reinigung und Ablosen der Korrosionsprodukte

Korrosionsmedium und Lagertemperatur

Ausgangszustand

Freiraum im KfK-Zwischenlager (in situ), ca. 9°C

Steinsalz in der SchachtanlageASSE (in situ, -775 m Sohle), ca. 30°C

Gesättigte Salzlösung (Q-Lösung), 50°C

Eisenerz in der SchachtanlageKonrad (in situ, Wetterteststrecke -1250 m Sohle), 42°C

Salzhaltiges Konrad-Tiefenwasser, 50°C

Mit Epoxidharzsystem (150 µm) beschichtete ebene Proben (1,5 x 100 x 200 mm)

(1) (2) (3) (4)

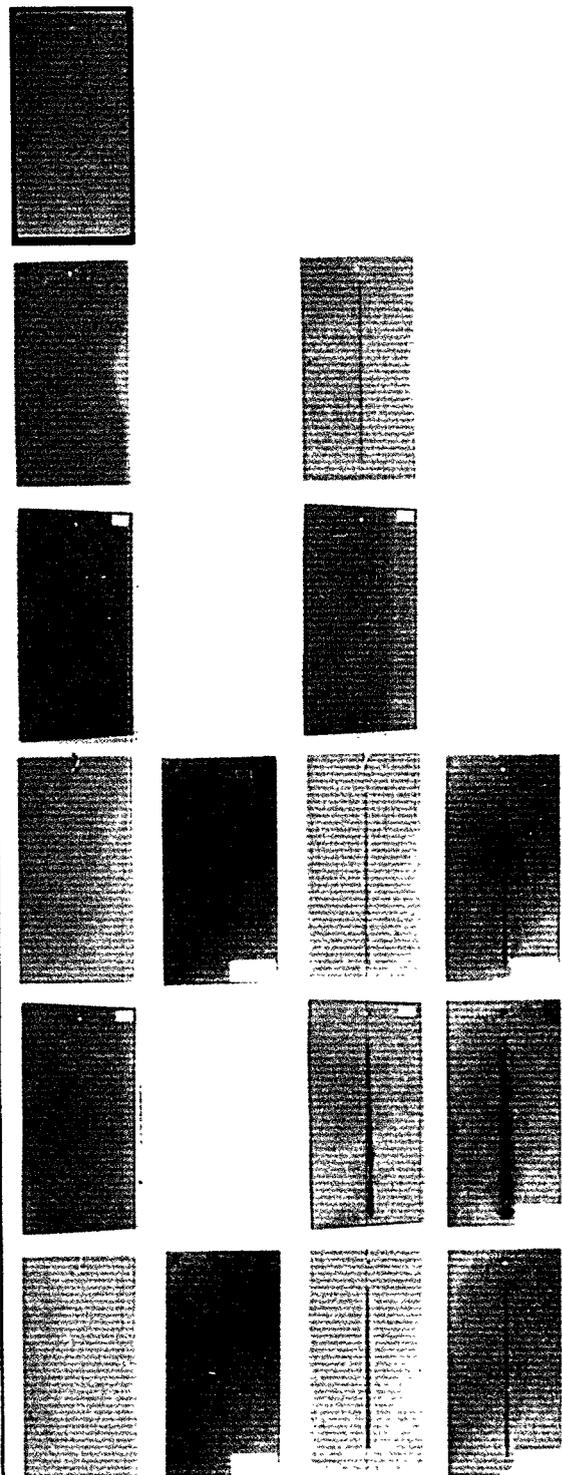


Fig. 9: Lackbeschichtete USt 1203-Proben nach 365 Tagen Außenbeanspruchung

- (1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
- (2) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Vorderseite
- (3) Probe nach der Beanspruchung / Rückseite mit Lackbeschädigung
- (4) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Rückseite mit Lackbeschädigung

**Korrosionsmedium und
Lagertemperatur**

Ausgangszustand

**Freiraum im KfK-
Zwischenlager (in situ),
ca. 9°C**

**Steinsalz in der Schachtanlage
Asse (in situ, -775 m Sohle),
ca. 30°C**

**Gesättigte Salzlösung
(Q-Lösung), 50°C**

**Eisenerz in der Schachtanlage
Konrad (in situ, Wettertest-
strecke -1250 m Sohle), 42°C**

**Salzhaltiges Konrad-
Tiefenwasser, 50°C**

**Mit Polyurethansystem (500 µm)
beschichtete ebene Proben
(1,5 x 100 x 200 mm)**

(1) (2) (3) (4)

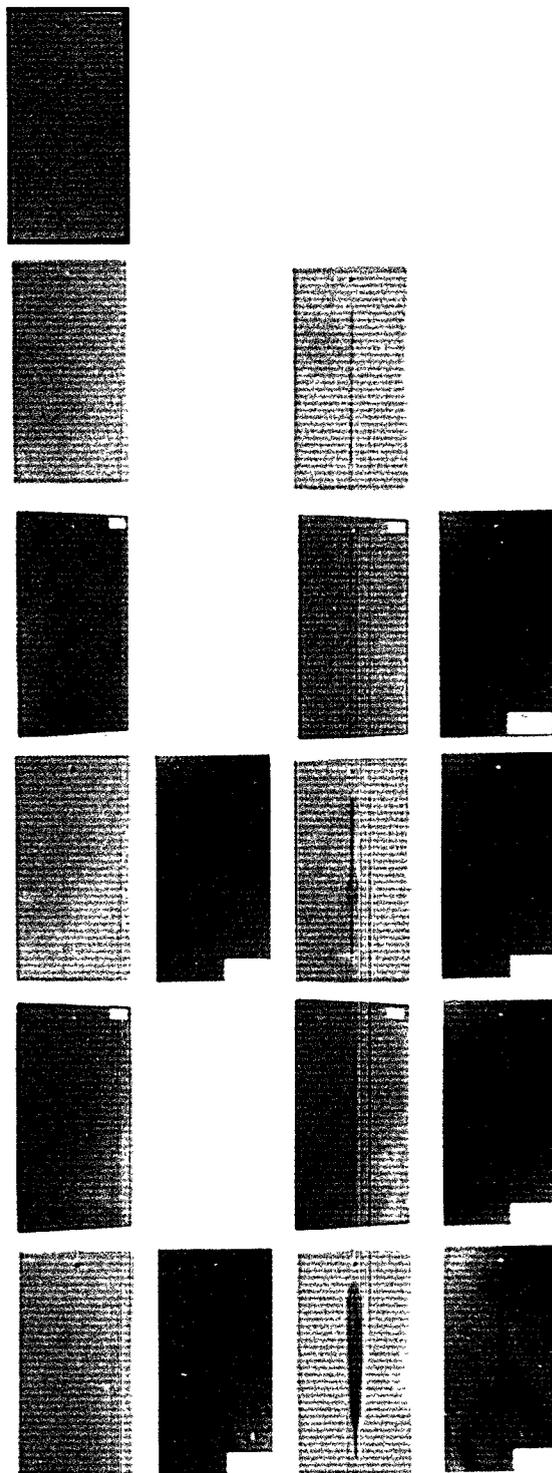


Fig.10: Lackbeschichtete USt 1203-Proben nach 365 Tagen Außenbeanspruchung

- (1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
- (2) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Vorderseite
- (3) Probe nach der Beanspruchung / Rückseite mit Lackbeschädigung
- (4) Probe nach Abbeizen der Beschichtung / Rückseite mit Lackbeschädigung

Korrosionsmedium und Lagertemperatur

Ausgangszustand

Freiraum im KfK-Zwischenlager (in situ), ca. 9°C

Steinsalz in der Schachanlage Asse (in situ, -775 m Sohle), ca. 30°C

Gesättigte Salzlösung (Q-Lösung), 50°C

Eisenerz in der Schachanlage Konrad (in situ, Wetterteststrecke -1250 m Sohle), 42°C

Salzhaltiges Konrad-Tiefenwasser, 50°C

Unbeschichtete ebene Proben (1,5 x 100 x 200 mm)

(1)

(5)

(5)

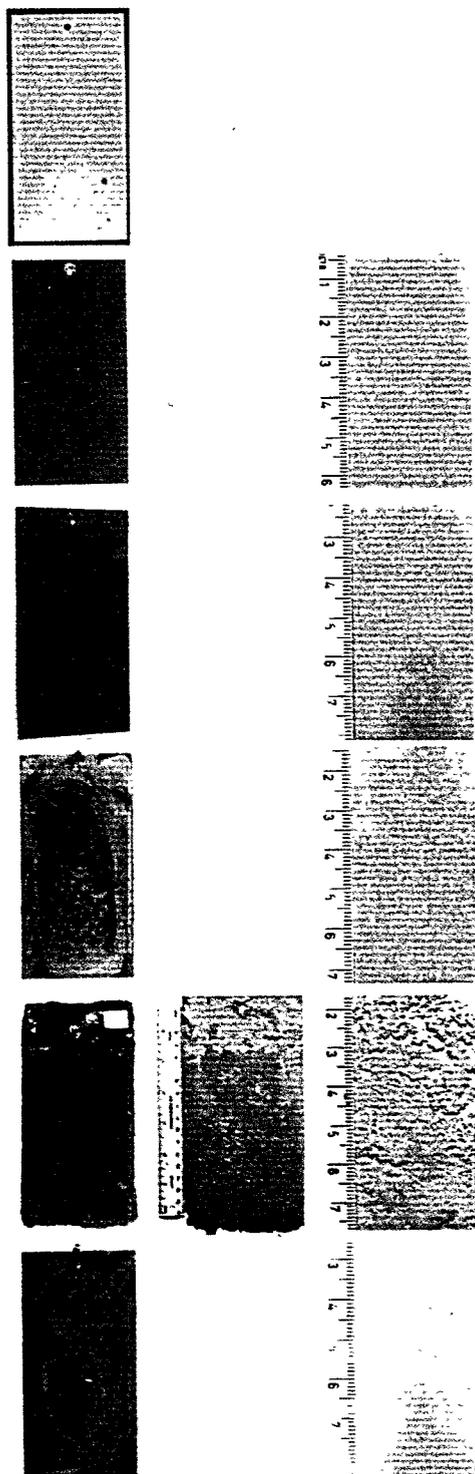


Fig.11: Ebene USt 1203-Proben nach 365 Tagen Außenbeanspruchung

(1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
 (5) Probe nach Reinigung und Ablosen der Korrosionsprodukte

**Korrosionsmedium und
Lagertemperatur**

Ausgangszustand

**Freiraum im KfK-
Zwischenlager (in situ),
ca. 9°C**

**Steinsalz in der Schachanlage
Asse (in situ, -775 m Sohle),
ca. 30°C**

**Gesättigte Salzlösung
(Q-Lösung), 50°C**

**Eisenerz in der Schachanlage
Konrad (in situ, Wettertest-
strecke -1250 m Sohle), 42°C**

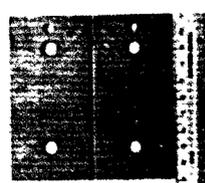
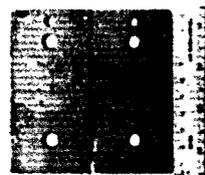
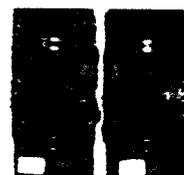
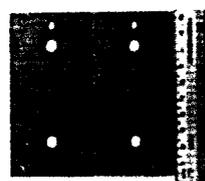
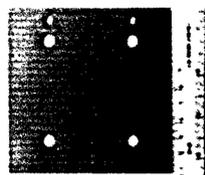
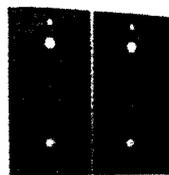
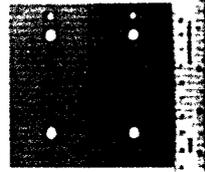
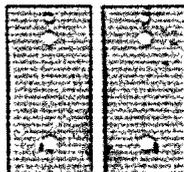
**Salzhaltiges Konrad-
Tiefenwasser, 50°C**

**Unbeschichtete verschraubte
Spaltproben
(1,5 x 50 x 100 mm)**

(1)

(6)

(7)



KfK

Fig.12: USt 1203-Spaltproben nach 365 Tagen Außenbeanspruchung

- (1) Probe nach der Beanspruchung / Vordersite
- (6) Probe nach der Beanspruchung / Innenseiten
- (7) wie (6) jedoch nach Reinigung und Ablosen der Korrosionsprodukte

Korrosionsmedium und Lagertemperatur

Ausgangszustand

Freiraum im KfK-Zwischenlager (in situ), ca. 9°C

Steinsalz in der SchachtanlageASSE (in situ, - 775 m Sohle), ca. 30°C

Gesättigte Salzlösung (Q-Lösung), 50°C

Eisenerz in der SchachtanlageKonrad (in situ, Wetterteststrecke - 1250 m Sohle), 42°C

Salzhaltiges Konrad-Tiefenwasser, 50°C

Unbeschichtete gebogene Schweißproben (1,5 x 100 x 200 mm)

(1)

(5)

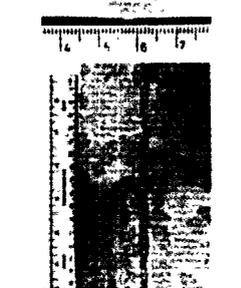
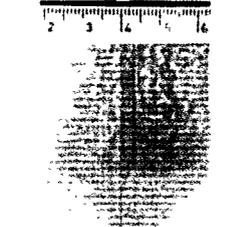
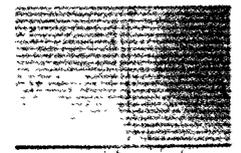
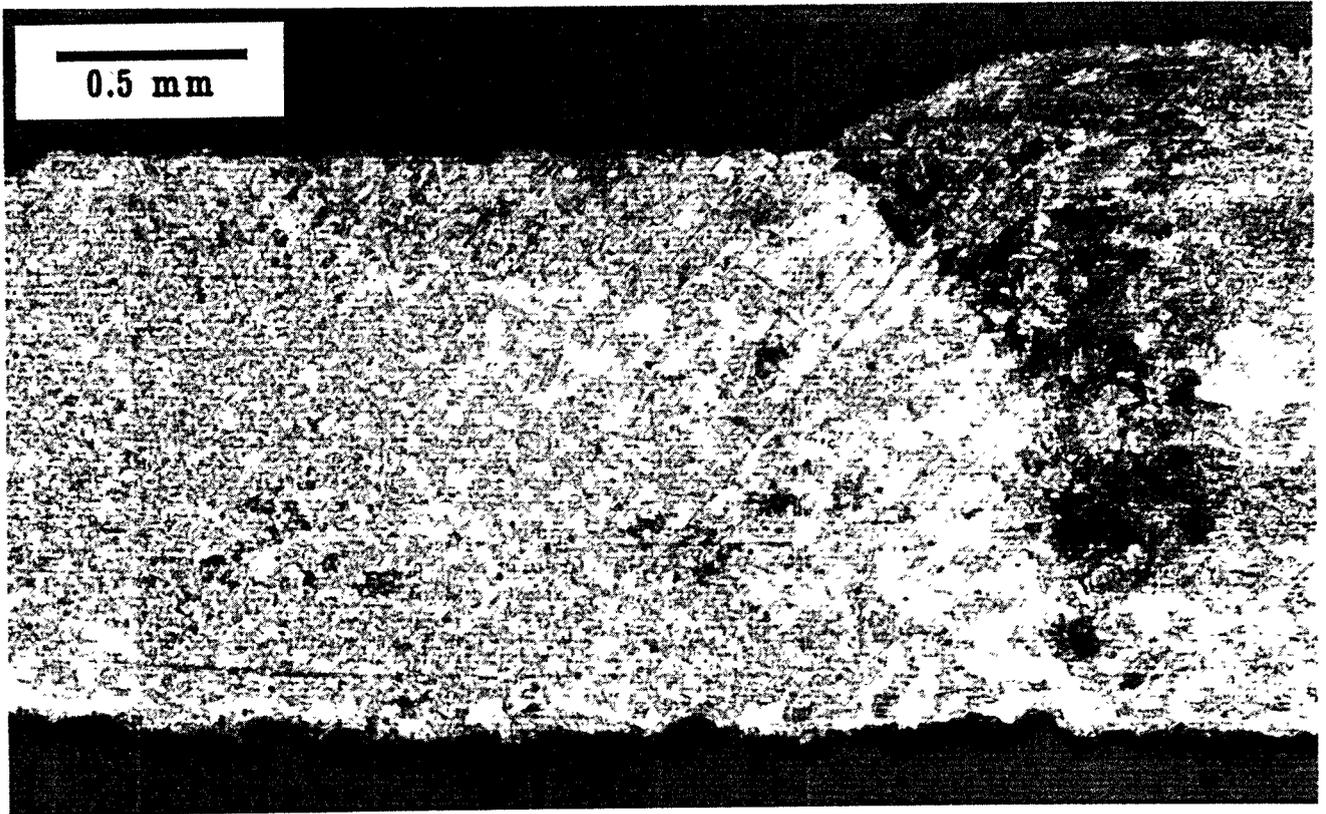
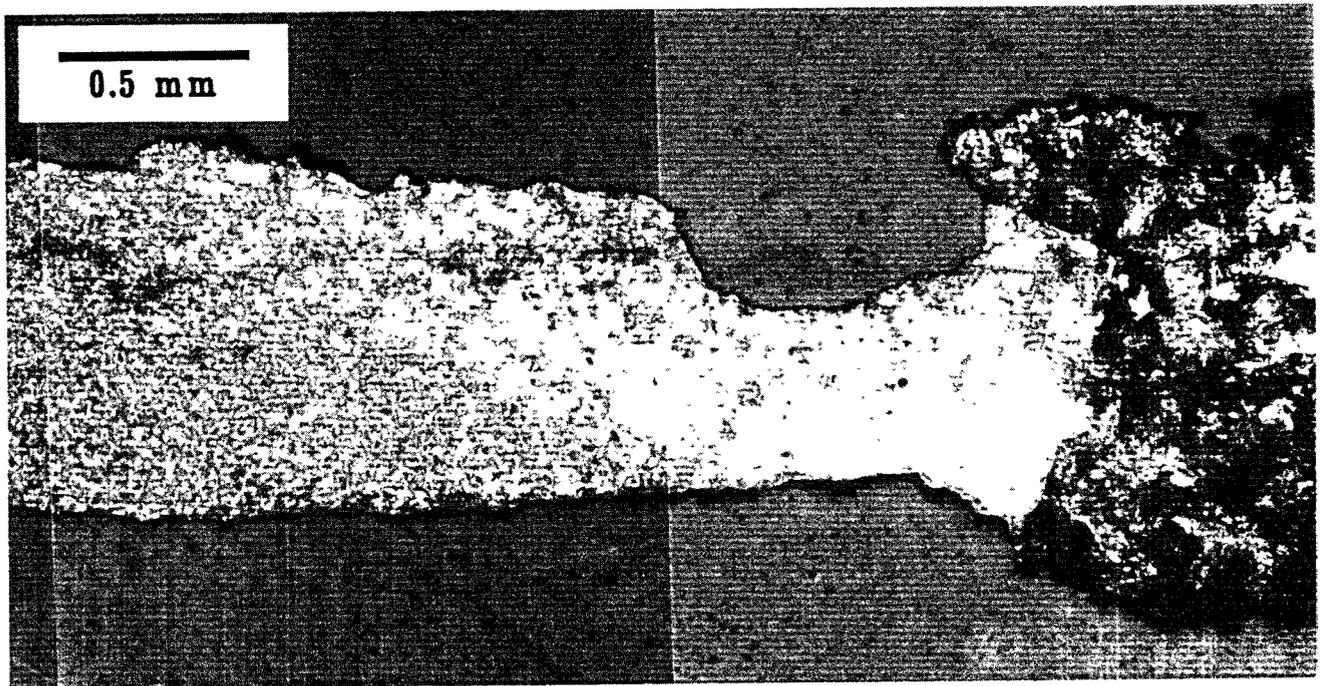


Fig.13: Geschweißte USt 1203-Proben nach 365 Tagen Außenbeanspruchung

(1) Probe nach der Beanspruchung / Vorderseite
(5) Probe nach Reinigung und Ablosen der Korrosionsprodukte



(a) Schweißnahtbereich vor der Korrosionsbeanspruchung



(b) Schweißnahtbereich nach der Korrosionsbeanspruchung

KfK

Fig.14: Schliffbild der Wärmeeinflußzone einer geschweißten USt 1203-Probe vor und nach 378 Tagen Lagerung in feuchtem Eisenerz in einer unbewitterten Strecke auf der 1250 m-Sohle der Schachanlage Konrad

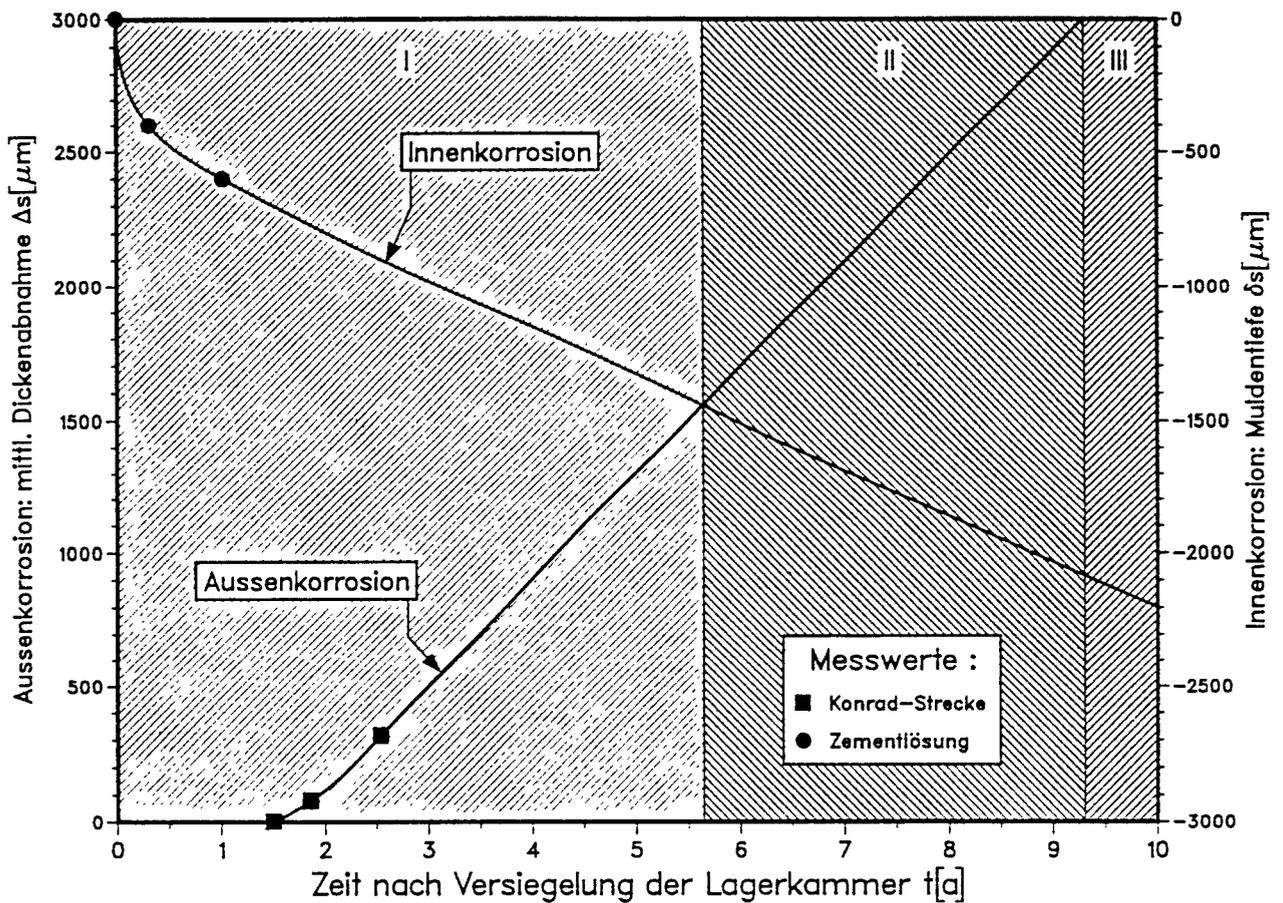


Fig.15: Möglicher Korrosionsverlauf im Bereich großflächiger, innen und außen gegenüberliegender Lackbeschädigungen bei der Lagerung eines KfK-Produkt-Stahlblechcontainers in einer mit Eisenerz versetzten und versiegelten Lagerstrecke auf der -1250 m Sohle der Schachanlage Konrad.
(Behälterinhalt: zementiertes Abfallprodukt, z.B. Stahlpreßlinge)

- Bereich I : keine Durchrostungen,
 Bereich II : Durchrostungen im Bereich der Lackbeschädigungen an der Trennungslinie zwischen zementiertem Abfallprodukt und darüberliegendem Leervolumen,
 Bereich III: Durchrostungen im Bereich aller äußerer Lackbeschädigungen.