



Physikalisch-Technische Bundesanstalt

DECKBLATT

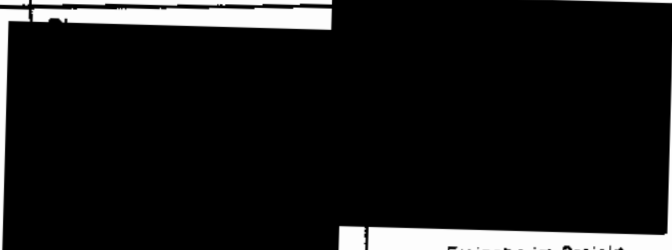
Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NN A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	N N
9K	35215.34	-	-	-	-	G E	RB	0 001 00	

Titel der Unterlage Korrosion von im Bohrloch verbliebener Verrohrung (lfd. Nr. 220)	Seite I.
	Stand 29.11.88 Dez. 1988

Ersteller TU Clausthal	Textnummer
---------------------------	------------

Stempelfeld

PSP-Element TP 2: 9K/212855	zu Plan-Kapitel: 3.9.5
-----------------------------	------------------------

		Freigabe im Projekt
--	--	---------------------

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

Abteilung Korrosion und Korrosionsschutz
Institut für Metallkunde und Metallphysik
Technische Universität Clausthal

Korrosion von im Bohrloch verbliebener Verrohrung

Bearbeiter

29. November 1988

Diese Studie wurde im Auftrag der PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB) erstellt. Die PTB behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf die Studie nur mit Zustimmung der PTB zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse von Rechnungen zur Korrosionsgeschwindigkeit unlegierter Stähle wurden mit Abschätzungen der Korrosionsgeschwindigkeiten archäologischer Eisenfunde verglichen. Es ergeben sich die gleichen Größenordnungen. Danach ist zu erwarten, daß die im Bohrloch verbliebenen Verrohrungen mit Wandstärken von etwa 8 mm bis 9 mm in Zeiten der Größenordnung $10^{4(+1)}$ Jahren vollständig durchkorrodieren. Schon nach Zeiten der Größenordnung 10^3 Jahren wird vermutlich die mechanische Festigkeit der Verrohrung so weit vermindert sein, daß lokal mit Brüchen zu rechnen ist. Wenn dieser Vorgang in quellfähigem, tonhaltigem Boden stattfindet, können sich in der durch Sedimentation der Bohrspülung verbliebenen Wassersäule Propfen bilden, die die Wassersäule unterbrechen.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Beschreibung des Korrosionssystems	2
3.	Korrosionsvorgänge an Stahlrohren im Boden	3
4.	Ansätze zu quantitativen Beschreibung der Korrosionsgeschwindigkeit von unlegierten Stählen in Böden	6
5.	Auswirkung der Korrosion auf die Stabilität der im Bohrloch verbliebenen Verrohrung	12
6.	Literaturverzeichnis	14
7.	Abbildung	17

1. Einleitung

In der Umgebung der als Endlager für radioaktive Abfälle vorgesehenen Schachanlage Konrad sind im Laufe früherer bergmännischer Tätigkeiten Bohrungen niedergebracht worden. Die Bohrungen wurden verrohrt und später verfüllt, wobei die Verrohrung in einigen Bohrungen nur teilweise entfernt wurde /1/. Die in geologischen Formationen der Unterkreide verbliebenen Verrohrungen verhindern, daß die Bohrungen durch das Quellen der Tone verschlossen werden. Andererseits ist eine Korrosion der Stahlrohre zu erwarten. Sie verlieren dabei an mechanischer Festigkeit. Schon bevor der Stahl vollständig korrodiert ist, können die Rohre eventuell mechanisch zerstört werden.

Ziel der Untersuchung ist es, die Korrosionsvorgänge an den Stahlrohren qualitativ zu beschreiben und die Korrosionsgeschwindigkeiten über lange Zeiträume abzuschätzen. Daraus soll geschlossen werden auf die Veränderung der Verrohrung innen und außen und auf ihre Stabilität im Laufe langer Zeiten.

2. Beschreibung des Korrosionssystems

Die Rohre der Qualitäten K 55 oder J 55 mit Außendurchmessern von 8 5/8 Zoll (210,1 mm) oder 6 5/8 Zoll (168,3 mm) bestehen aus unlegiertem Baustahl. Die Wandstärken waren ursprünglich entweder 8,94 mm für beide Durchmesser oder 7,72 mm für das dickere und 7,32 mm für das dünnere Rohr. Bei der Verfüllung ist die Verrohrung in vielen Fällen abschnittsweise in der Bohrung verblieben, zum Teil auch in geologischen Formationen der Unterkreide. Dort kann die Verrohrung die Abdichtung durch quellende Tongesteine verhindern und so die Wasserdurchlässigkeit erhöhen. Die Rohre sind mit Bohrspülung gefüllt, aus denen die Feststoffanteile bis zu etwa 44% der Gesamthöhe sedimentiert sind.

Nach einer umfangreichen Untersuchung der GSF /2/ werden in größeren Tiefen unterhalb etwa 100 m originäre NaCl-Tiefengrundwässer mit im Mittel 230 g/l gelösten anorganischen Bestandteilen angetroffen. Die Wässer enthalten neben der konzentrierten, etwa 3 M Salzlauge als möglicherweise korrosionswirksame Nebenbestandteile im Mittel 8 mM Sulfat, 1,3 mM Borat und 0,6 mM Hydrogencarbonat. Der pH-Wert liegt zwischen pH 4,5 und pH 6,8, im Mittel bei pH 5,5. Das bei 76 bar Gebirgsdruck gelöste Gas enthält rund 1 Vol% Kohlendioxid und 0,5 Vol% Sauerstoff. Der Gasdruck kann den Gebirgsdruck nicht übersteigen. Deshalb können die Partialdrucke des Kohlendioxid 0,76 bar und des Sauerstoffs 0,38 bar erreichen, entsprechend Konzentrationen im Wasser von bis zu 18 mM Kohlendioxid und bis zu 0,9 mM Sauerstoff. Die Temperaturen steigen von etwa 16°C in 100 m Tiefe auf etwa 45°C

in 1000 m Tiefe an /3/. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Wässer sind von der Größenordnung $1 \mu\text{m/a}$ bis 1mm/a , also sehr gering. Innerhalb der Verrohrung kann das Wasser mit Geschwindigkeiten von etwa $0,1 \text{dm}^3/\text{min}$ von unten nach oben strömen.

Die oberflächennahen Grundwässer /4/ enthalten weniger Chlorid und Sulfat als die Grundwässer aus großen Tiefen, aber etwa 10-mal soviel Hydrogencarbonat. Der pH-Wert liegt um pH 7. Daraus läßt sich schließen, daß der Gehalt an freier Kohlensäure vernachlässigbar gering sein muß.

3. Korrosionsvorgänge an Stahlrohren im Boden

Stahl kann in Böden durch Reduktion von Sauerstoff oder unter Wasserstoffentwicklung korrodieren /5,6/. Bei hohen Sauerstoffgehalten und pH-Werten wird der Stahl passiv. Die Korrosionsgeschwindigkeit wird dann durch die Auflösungs- geschwindigkeit des dreiwertigen Eisens aus der passivierenden Oxidschicht bestimmt. Als sekundäre Korrosionsprodukte ent- stehen Eisenoxidhydrate, deren Löslichkeit für dreiwertiges Eisen in Wässern oberhalb etwa pH 4 unter $1 \mu\text{M}$ absinkt /7/.

Wegen des Verbrauchs durch die Korrosion nimmt in ruhenden Wässern die Konzentration des Sauerstoffs in der Umgebung des Stahles im Laufe der Zeit ab. Dementsprechend wird das Korrosionspotential negativer. Das passivierende Oxid ändert dabei seine Stöchiometrie von Fe_2O_3 in Richtung Fe_3O_4 . Zu- gleich erhöht sich die Löslichkeit für zweiwertiges Eisen.

Sie liegt nur im pH-Bereich zwischen etwa 9,5 und 12,5 unter $1 \mu\text{M}$ und steigt von diesem Bereich minimaler Löslichkeit aus nach kleineren und größeren pH-Werten hin exponentiell an. Bei Zutritt von Sauerstoff wird das zweiwertige Eisen unter Bildung von Eisen(III)oxidhydrat ausgefällt.

Das Korrosionspotential kann schließlich bis auf das Bildungspotential von Magnetit absinken, d.h. bei 300 K bis auf etwa $E = -0,1 \text{ V}$ gegen die reversible Wasserstoffelektrode bei einem Wasserstoffpartialdruck von 1 bar in der gleichen Lösung. Bei diesem Potential ist auch Korrosion unter Wasserstoffentwicklung möglich. Das Löslichkeitsprodukt des Magnetits, die Löslichkeit und der pH-Wert im Gleichgewicht in reinem Wasser sowie der Gleichgewichtsdruck des Wasserstoffs bei verschiedenen Temperaturen und Systemdrücken wurden bereits früher berechnet /8/. Solange die Löslichkeitsgrenze noch nicht erreicht ist, kann das Korrosionspotential auch unter das Bildungspotential des Magnetits absinken. In ruhenden, annähernd neutralen Lösungen ist dies aber wegen der Diffusionshemmung und der kleinen Aktivitäten des zweiwertigen Eisens im Wasser nur möglich, wenn es Komplexbildner für zweiwertiges Eisen enthält. Dazu rechnen Anionen wie Sulfat, Chlorid und Hydrogencarbonat, aber auch verschiedene organische Bestandteile, die in Wässern vorkommen können.

Jedenfalls verläuft nach längeren Zeiten in Böden mit geringer Strömungsgeschwindigkeit des in ihm vorhandenen Wassers die Korrosion im wesentlichen unter Bildung von Magnetit ähnlich wie in geschlossenen Haushaltsinstallationen

("schwarzer Rost"). Da die Auflösungs geschwindigkeit des zweiwertigen Eisens aus Magnetit sehr groß ist, wird die Korrosionsgeschwindigkeit in diesem Fall im wesentlichen durch Diffusionsprozesse bestimmt. Außer der Diffusion der Oxidationsmittel wie Sauerstoff oder Säure zum Stahl kann auch die Abdiffusion der Korrosionsprodukte wie Wasserstoff oder gelösten Eisenionen sowie die Diffusion in einer kompakten Magnetitdeckschicht die Geschwindigkeit bestimmen /8/. Es ist bekannt, daß bei erhöhter Temperatur (wenigstens ab 420 K) das Wachstum der Magnetitschicht nach dem parabolischen Zeitgesetz geschwindigkeitsbestimmend ist, d.h. die Korrosionsgeschwindigkeit nimmt umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Zeit ab. Da aber die spröde Oxidschicht über längere Zeiträume wegen mechanischer Spannungen nicht kompakt bleibt, stellt sich nach einiger Zeit eine praktisch konstante Korrosionsgeschwindigkeit ein, die u.a. von der Geometrie des korrodierenden Werkstücks abhängt.

In Böden gibt es noch einige weitere Korrosionsprozesse /9-11/. Es können sich aus verschiedenen Gründen Kurzschlußzellen ausbilden. Die freien Korrosionspotentiale hängen von der Zusammensetzung des Wassers ab, z.B. vom pH-Wert und der Sauerstoffkonzentration, aber auch von der Temperatur. Diese Parameter sind gegeben durch die Art der geologischen Schichten und der Tiefe. Verbindet man die Orte verschiedener freier Korrosionspotentiale mit Potentialdifferenzen um bis zu 0,5 V durch ein metallisch leitendes Rohr, so fließen Kurzschlußströme, die bis zu Entfernungen von einigen km beobachtet wurden /9/. Anodische Ströme, die eine Korrosion hervorrufen, fließen zu den Orten mit dem negativeren freien

Korrosionspotential und erhöhen dort in der Regel die Korrosionsgeschwindigkeit, während an den Orten mit positiverem Freiem Korrosionspotential die Korrosionsgeschwindigkeit regelmäßig erniedrigt wird. Es kann aber auch vorkommen, daß aktiver Stahl in einem alkalischen Wasser von seinem sehr negativen Freien Korrosionspotential bis in den passiven Bereich polarisiert wird oder passiver Stahl in einem relativ sauren Wasser von seinem positiven Freien Korrosionspotential bis in den aktiven Bereich.

In unbelüfteten, sulfathaltigen Böden, insbesondere in Tonen, wird das Sulfat durch mikrobiologische Stoffwechsellvorgänge reduziert. Das ansonsten inerte Sulfat wirkt als Oxidationsmittel und fördert dadurch die Korrosion. Es sind auch noch andere Beispiele von mikrobiologischer Korrosion bekannt, die aber in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielen.

4. Ansätze zur quantitativen Abschätzung der Korrosionsgeschwindigkeit von unlegierten Stählen in Böden

Die Korrosion von Stahl in Böden ist bisher vorwiegend auf drei Gebieten untersucht worden: Archäologische Eisenlager, Rohrleitungen für Öl und Erdgas, Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Die Korrosion archäologischer Eisenlager liefert einigermaßen realistische Korrosionsgeschwindigkeiten. Übersichten finden sich in zwei Berichten /12,13/. Abb.1 gibt eine Zu-

sammenfassung der Auswertung von 44 Eisenfunden. Der Vergleich mit dem vorliegenden Fall ist dadurch erschwert, daß die Eisenlager meist in relativ geringen Tiefen und oft in oxidierenden Böden gefunden wurden. Unter diesen Bedingungen liegen die Korrosionsgeschwindigkeiten in nassen Böden an der oberen Grenze der wahrscheinlichen Werte im Bereich von bis zu 10 mm in 1000 Jahren. In anaeroben Böden waren die Korrosionsgeschwindigkeiten regelmäßig zwischen 0,1 mm und 2 mm pro tausend Jahre. In einzelnen Fällen wurden in wahrscheinlich trockenen Böden Korrosionsgeschwindigkeiten bis herunter zu 3 µm pro 1000 Jahre gefunden. Es ist wohl aber nicht gerechtfertigt, mit geometrieunabhängigen und zeitlich konstanten Korrosionsgeschwindigkeiten zu rechnen, wie die Überlegungen weiter unten zeigen werden.

Wesentlich höhere Korrosionsgeschwindigkeiten bis zu 0,03 mm pro Jahr wurden zuweilen an ungeschützten Teilen von Rohrleitungen für Erdgas und Öl oder an Stahlfundamenten beobachtet, allerdings nur während relativ kurzer Beobachtungszeiten von wenigen Jahren /14,15/. Die Korrosionsgeschwindigkeiten unterirdischer Verkehrsbauwerke liegen oft noch höher /10, p. 119/. Die großen Korrosionsgeschwindigkeiten sind auf eine schnelle Sauerstoffzufuhr und auf Belüftungselemente zurückgeführt worden. In vielen Fällen kommen auch noch Streuströme hinzu. Mit diesen Ursachen einer erhöhten Korrosionsgeschwindigkeit ist für die Außenkorrosion der Verrohrung von Bohrungen nur in untergeordnetem Maße zu rechnen; d.h die Korrosionsgeschwindigkeiten werden hier wesentlich geringer sein als dicht unter der Erdoberfläche.

Im Rohrinne- ren ist nicht mit Sauerstoff zu rechnen, es sei denn, daß Sauerstoff mit der Flüssigkeitsströmung von unten zutreten kann oder die Rohre nicht ganz mit Wasser und Sedi- ment gefüllt sind und deshalb Sauerstoff von der Erdoberflä- che her durch den Gasraum transportiert wird. Ohne Sauer- stoffzutritt ist die Korrosionsgeschwindigkeit im Rohrinne- ren erheblich niedriger als außen.

Die Modellrechnungen /8, 13, 16/ und die Versuche /17/, die im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle angestellt wurden, ergeben größenordnungsmäßig ähnliche Korrosionsgeschwindigkeiten wie die archäologischen Befunde. Jedoch muß man immer mit parabolischen Geschwindigkeits- gesetzen der Korrosion rechnen, d.h. mit geschwindigkeits- bestimmenden Diffusionsprozessen. Die Korrosionsgeschwin- digkeit j ist dann im wesentlichen umgekehrt proportional zur Zeit t :

$$j = (k/t)^{1/2} \quad (1).$$

Die Geschwindigkeitskonstante k charakterisiert den jewei- ligen Diffusionsprozess. Gräfen und Heitz /13/ nahmen als geschwindigkeitsbestimmenden Schritt die Diffusion von Sauerstoff an. Drückt man die Korrosionsgeschwindigkeit als Abtragungsgeschwindigkeit des Eisens unter Bildung von Magnetit als Korrosionsprodukt aus, so wird die Geschwindig- keitskonstante

$$k = (n/n')^2 V^2 c^2 (D/\pi) \quad (2)$$

mit den Ladungszahlen $n = 4$ für die Reduktion von Sauerstoff zu Wasser und $n' = 8/3$ für die Oxidation des Eisens zu Magnetit, mit dem Molvolumen $V = 7,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ des Eisens sowie mit dem Diffusionskoeffizienten D und der Konzentration c des Sauerstoffs in weitem Abstand vom Werkstück. Für $c = 0,9 \text{ mol/m}^3$ und $D = 8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ erhält man etwa $k = 2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$.

Diese Abschätzung gilt aber nur für eine unendlich ausgedehnte ebene Platte. An ihr wird die stationäre Korrosionsgeschwindigkeit null. Für endliche Körper stellt sich eine endliche stationäre Korrosionsgeschwindigkeit ein. Am einfachsten ist sie für kugelförmige Körper mit dem Radius r zu berechnen. Man findet eine Erhöhung der durch Gln.(1) und (2) gegebenen Geschwindigkeit um

$$j_{st} = (n/n')VcD/r \quad (3)$$

Für ein zylindrisches Rohr erhält man einen komplizierten mathematischen Ausdruck, der eine etwas geringere Geschwindigkeit als für die Kugel ergibt. Schätzt man mit Gl. (3) die stationäre Geschwindigkeit für die Rohre mit den Durchmessern 210 mm und 168 mm ab, so erhält man unter den genannten Bedingungen etwa $j_{st} = 9 \cdot 10^{-15} \text{ m/s}$ entsprechend rund $270 \text{ } \mu\text{m}$ pro 1000 Jahre. Der Beitrag von Gl.(2) zum Abtrag in den ersten 1000 Jahren ist nur etwa 3% des Beitrages von Gl. (2). Die Korrosionsgeschwindigkeiten der archäologischen

Eisenfunde sind nicht nach deren geometrischer Größe geordnet worden. Mit der Annahme, daß die Korrosionsgeschwindigkeit umgekehrt proportional dem Radius eines Eisenfundes ist, berechnet man Größen zwischen etwa 8 m für die kleinste Abtragung von 3 μm in 1000 Jahren über 24 cm für einen Abtrag von 0,1 mm/1000 a bis 12 mm für einen Abtrag von 2 mm/1000 a. Es ist klar, daß höhere Abtraggeschwindigkeiten für 1000 und mehr Jahre alte Objekte nicht gefunden wurden, weil sie dann so klein sind, daß von dem Eisenkern nichts mehr übrig geblieben ist.

Im Falle der im Bohrloch verbliebenen Verrohrung kann die Korrosionsgeschwindigkeit durch die mikrobiologische Reduktion des Sulfats und durch Wasserstoffentwicklung aus Wasser oder Säuren, insbesondere dem Hydrogencarbonat, über die auf Reduktion von Sauerstoff beruhende Korrosion erhöht sein. Das Tiefenwasser enthält etwa 1 mM Hydrogencarbonat. Mit der Annahme eines Diffusionskoeffizienten von $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ erhält man aus Gl.(3) eine stationäre Korrosionsgeschwindigkeit von rund 1,3 mm in 1000 Jahren. Wenn das Sulfat im Tiefenwasser tatsächlich in der hohen Konzentration von etwa 0,8 g/l entsprechend 8 mM vorhanden ist und die mikrobielle Aktivität dieses Oxidationsmittel voll nutzbar macht, könnte für einen Diffusionskoeffizienten von $0,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ der Abtrag in 1000 Jahren 5,7 m erreichen. Die archäologischen Befunde sprechen gegen einen wesentlichen Einfluß der mikrobiellen Korrosion.

Die Korrosionsgeschwindigkeit erhöht sich mit der Strömungs-

geschwindigkeit des Wassers. Der Effekt auf die Außenkorrosion der Verrohrung ist wahrscheinlich sehr gering. Eine grobe Abschätzung für die untere Grenze der Nernst'schen Diffusionsschichtdicke δ ergibt sich aus

$$\delta = 3(l/v)^{1/2} v^{1/6} D^{1/3}$$

mit der Annahme einer Strömung der Geschwindigkeit $v = 1$ mm/a senkrecht zum Rohr mit dem Durchmesser $l = 0,2$ m, der kinematischen Viskosität $\nu = 10^{-6}$ m²/s und dem Diffusionskoeffizienten $D = 10^{-9}$ m²/s. Das Resultat ist $\delta = 51$ m. Daraus ergibt sich mit einer Konzentration $c = 1$ mol/m³ des Oxidationsmittels eine zusätzliche stationäre Korrosionsgeschwindigkeit der Größenordnung $2 \mu\text{m}/1000$ a.

Wenn durch das Rohr innen das Wasser aus der Tiefe nach oben strömt, weil z.B. die Zementpfropfen in der Verrohrung undicht sind, so wird das Rohr von unten her durch Korrosion angegriffen; denn die Oxidationsmittel werden innerhalb des Rohres auf einer im Verhältnis zur Rohrlänge kurzen Strecke vollständig verbraucht. Es bildet sich eine keilförmige Korrosionszone aus, unter der der Stahl vollständig durchkorrodiert ist. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,1$ l/min und der genannten Konzentration des Oxidationsmittels korrodieren

$$j = (n/n')vcv$$

oder etwa $2,8 \cdot 10^{-4}$ m³ Eisen pro Jahr, die in einem ringförmigen Volumen

$$V = (r_a^2 - r_i^2) \pi h$$

mit dem Außenradius r_a und dem Innenradius r_i sowie die Höhe h enthalten sind. Damit werden die Korrosionsgeschwindigkeiten etwa $dh/dt = 0,1$ m/a für das engere und $dh/dt = 0,15$ m/a für das weitere Rohr. Die Geschwindigkeit der Innenkorrosion infolge der Strömung durch das Rohr wäre demnach größenordnungsmäßig ebenso groß wie die der Außenkorrosion. Die beiden Korrosionsformen schreiten jedoch wie erläutert geometrisch in verschiedener Weise fort.

5. Auswirkung der Korrosion auf die Stabilität der im Bohrloch verbliebenen Verrohrung

Nach der obigen Rechnung ist mit einer Korrosionsgeschwindigkeit der ungefähren Größenordnung $0,5$ mm/1000 a zu rechnen. Mit einem solchen wahrscheinlichsten Wert für die Außenkorrosion wäre die 7 mm bis 9 mm dicke Wand nach etwa $14\ 000$ bis $18\ 000$ Jahren vollständig durchkorrodiert. Legt man die archäologischen Befunde zugrunde, so liegt diese Zeit wahrscheinlich zwischen $4\ 000$ und $80\ 000$ Jahren. Kürzere Zeiten sind zu erwarten, wenn Sauerstoff gasförmig bis auf relativ kurze Abstände von der Größenordnung Meter an das Rohr herangeführt wird, oder wenn die mikrobielle Korrosion bedeutenden Einfluß hat.

Ausgehend von Lecks in den Zementverfüllungen kann zusätzlich die vollständige Korrosion der Verrohrung fortschreiten.

Die Standfestigkeit der Rohre wird schon beeinträchtigt, lange bevor die Rohrwandung vollständig durchkorrodiert ist. An langen Rohrstücken besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Geschwindigkeit der Außenkorrosion durch lokale Umgebungsbedingungen irgendwo weit über dem Durchschnitt liegt. Dieser Effekt wird in der Regel durch Kurzschlußströme vermindert, jedoch niemals vollständig verhindert. Die Lochkorrosion passiver Metalle wird in anaeroben Salzlaugen nicht beobachtet.

Die durch Korrosion geschwächte mechanische Festigkeit der Rohre kann etwa unter dem Einfluß von Gebirgswegungen dazu führen, daß die Rohre zunächst lokal aufbrechen und an geeigneter Stelle anschließend durch das Eindringen quellfähiger Tone verschlossen werden. Es läßt sich nur schwer abschätzen, wann dieser Prozess beginnt. Die Größenordnung dürfte aber bei tausend Jahren liegen.

Literaturverzeichnis

- /1/ G. Grüneberg: Plan, Endlager für radioaktive Abfälle, Schachtanlage Konrad, Salzgitter, Erläuternde Unterlage zu Kapitel 3.5.9; PTB, Braunschweig, Juli 1987

- /2/ P. Faber, W. Rauert, W. Stichler, M. Wolf, GSF: Chemismus tiefer Grundwässer, Hydrochemische Untersuchungen und Altersdatierungen an tiefen Grundwässern aus dem Nahbereich der Schachtanlage Konrad; LV-Nr. 2219.05, AP-Nr. 7, Braunschweig, März 1986

- /3/ J. Kopietz, R. Jung, BGR: Temperaturmessungen in der Bohrung Konrad 101; Bericht zum BMFT Forschungsvorhaben KWA 53090, September 1986

- /4/ P. Faber, GSF: Chemismus tiefer Grundwässer, Radionuklidbestimmung und Altersdatierung an tiefen Grundwässern aus der Tiefbohrung Konrad 101; LV-Nr. 2219.5, AP-Nr. 5, November 1985

- /5/ H. Kaesche: Die Korrosion der Metalle, 2.Aufl.; Springer-Verlag, Heidelberg 1979

- /6/ A. Rahmel und W. Schwenk: Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen; Verlag Chemie, Weinheim 1977

- /7/ M. Pourbaix: Atlas d'Equilibres Electrochimiques, p. 311; Gauthiers-Villars, Paris 1963

- /8/ K. E. Heusler: Überlegungen zur Thermodynamik und Kinetik der Reaktion zwischen Eisen und Wasser in Bentonit, 23 p.; Nagra Technischer Bericht 85-22, Baden/Schweiz, Januar 1985
- /9/ U. R. Evans: The Corrosion and Oxidation of Metals, p.268 ff.; London 1960/61
- /10/ W. v. Baeckmann und W. Schwenk: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, p. 114 ff.; Verlag Chemie, Weinheim 1980
- /11/ H. Klas und H. Steinrath: Die Korrosion des Eisens und ihre Verhütung; Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1974
- /12/ A. B. Johnson jr. and B. Francis: Durability of Metals from Archeological Objects, Metal Meteorites and Native Metals; Report PNL-3198 UC-70, Richland WA, Batelle Pacific Northwest Laboratories, 1980
- /13/ Steag Kernerenergie GmbH, Essen, und Motor Columbus, Baden: Behälter aus Stahlguß für die Endlagerung verglasteter hochaktiver Abfälle; Nagra Technischer Bericht 84, 31, Baden, Schweiz 1984
- /14/ G. R. Eadie: Corrosion of Steel Piling - Results from a Test at Burnley, Victoria; Seasi Quarterly, Vol. 7, No. 4, p. 34 - 39 (1978)
- /15/ K. P. Fischer and B. Bue in: Underground Corrosion,

ASTM STP 741, p. 24 - 32; herausgegeben von E. Escalante, American Society for Testing Materials 1981

/16/ H. Gräfen und E. Heitz: Korrosion und Korrosionsschutz von Endlagerbehältern aus Eisenwerkstoffen unter besonderer Berücksichtigung des schweizerischen Endlagerkonzepts, Nagra Technischer Bericht 84-04, Baden/Schweiz 1984

/17/ J. P. Simpson und P.-H. Valloton: Experiments on Container Materials for Swiss High Level Waste Disposal Projects, Part III, Nagra Technical Report 86-25, Baden/Schweiz 1986

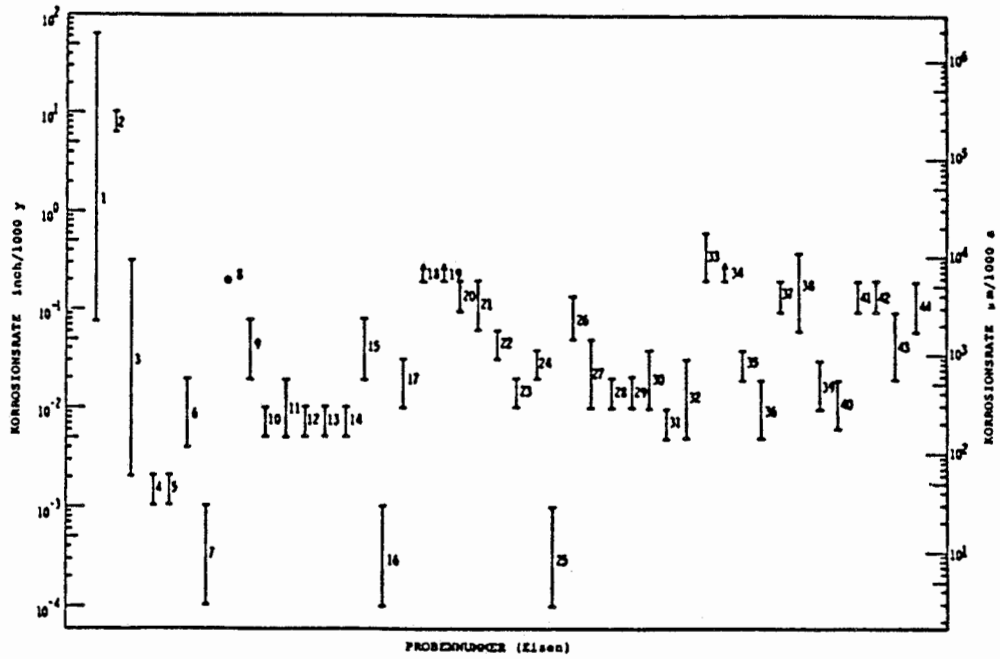


Abb. 1

Korrosionsgeschwindigkeiten archäologischer Eisenfunde
/12,13/