

# TECHNISCHER BERICHT 93-27

**Wasserstoffentwicklung durch  
Korrosion von Eisen und Stahl  
in anaeroben, alkalischen Medien  
im Hinblick auf ein SMA-Endlager**

Mai 1993

P. Kreis

Sulzer Innotec, Winterthur



# **TECHNISCHER BERICHT 93-27**

**Wasserstoffentwicklung durch  
Korrosion von Eisen und Stahl  
in anaeroben, alkalischen Medien  
im Hinblick auf ein SMA-Endlager**

Mai 1993

P. Kreis

Sulzer Innotec, Winterthur

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Der Autor hat seine eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

"Copyright (c) 1993 by NAGRA, Wettingen (Schweiz). / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Uebersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

	<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
	Zusammenfassung	II
	Summary	III
	Résumé	IV
1	Einführung	1
2	Introduction (in english)	1
3	Introduction (en français)	1
4	Zielsetzung	2
5	Experimentelles	2
	5.1 Messtechnik	2
	5.2 Berechnung	4
	5.3 Versuchsprogramm	4
	5.3.1 Medien	4
	5.3.2 Probenmaterial	5
6	Resultate	6
7	Diskussion der Resultate	9
8	Referenzen	10

## WASSERSTOFFENTWICKLUNG DURCH KORROSION VON EISEN UND STAHL IN ANAEROBEN, ALKALISCHEN MEDIEN IM HINBLICK AUF EIN SMA-ENDLAGER

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Produktion von Wasserstoff durch Korrosion von Eisen ist ein wichtiger Aspekt bei Endlagern für schwach- und mittelaktive Abfälle, da grosse Mengen an Eisen und Stahl in den Lagern enthalten sind. Der grösste Teil dieses Eisens befindet sich in einer zementhaltigen, anaeroben Umgebung.

Um Anhaltspunkte für Planung und Design eines zukünftigen Endlagers zu erhalten, wurden die Wasserstoffentwicklungsraten des korrodierenden Eisens in alkalischen, anaeroben Medien bestimmt. Die Messungen erfolgten mit Hilfe einer volumetrischen Methode, die sehr lange Versuchszeiten erlaubte.

Medium	maximale H <sub>2</sub> -Entwicklungsrate [ mmol / (m <sup>2</sup> ·a) ]	H <sub>2</sub> -Entwicklung nach 16000 h [ mmol / (m <sup>2</sup> ·a) ]
NaOH pH 12.8	13	0.5-1
KOH pH 12.8	13	0.5-1
Ca(OH) <sub>2</sub> pH 12.8	2	0.5
Zementporenw. Ia pH 13.2	4	1-2
Zementporenw. Ib pH 12.9	2.5	1-2
Zementporenw. II pH 12.5	1	0.5

**Tabelle 1:** Zusammenfassung der Resultate

Die gemessenen H<sub>2</sub>-Entwicklungsraten nach 16000 h sind tiefer als sie in der Literatur postuliert werden. Bei der Auslegung eines Endlagers sollte man aber konservativerweise eher von der maximal gemessenen Rate von 10 - 13 mmol H<sub>2</sub> / (m<sup>2</sup>·a) ausgehen.

Stichworte: Korrosion, Wasserstoffentwicklung, Zementporenwasser, anaerobe Korrosion

**SUMMARY**

The production of hydrogen gas from the corrosion of iron is an important issue in low-/intermediate-level nuclear waste repositories, where large quantities of iron and steel accompany the waste. Most of the iron in these repositories is in a cementitious, anaerobic environment.

As input for the design of a waste repository, the amount of hydrogen evolution from corroding iron in alkaline, anaerobic media was determined. The measurements were carried out using a volumetric method, which allows very long measuring times up to 16000 h.

media	maximum H <sub>2</sub> -evolution rate [ mmol / (m <sup>2</sup> ·a) ]	H <sub>2</sub> -evolution rate after 16000 h [ mmol / (m <sup>2</sup> ·a) ]
NaOH pH 12.8	13	0.5-1
KOH pH 12.8	13	0.5-1
Ca(OH) <sub>2</sub> pH 12.8	2	0.5
cement pore w. Ia pH 13.2	4	1-2
cement pore w. Ib pH 12.9	2.5	1-2
cement pore w. II pH 12.5	1	0.5

**Table 1:** Summary of results

The hydrogen evolution rates determined after 16000 h (2 years) are lower than reported in the literature. However for the design of a repository it would be wise to assume the maximum measured value of 10 - 13 mmol H<sub>2</sub> / (m<sup>2</sup>·a) since the different behaviour of monovalent and bivalent basis is not conclusive.

Keywords: corrosion, hydrogen evolution, cement pore water, anaerobic corrosion

## RESUME

La formation d'hydrogène par suite de la corrosion du fer est un aspect important à prendre en considération lors du stockage de déchets faiblement et moyennement radioactifs. En effet, le dépôt contient, à part les déchets proprement dits, des quantités importantes de fer et d'acier. La plus grande partie du fer se trouve dans un environnement anaérobique à base de ciment.

Afin d'estimation pour la conception d'un dépôt final, la quantité d'hydrogène formée lors de la corrosion du fer en milieu alcalin anaérobique a été déterminée. Une méthode volumétrique permettant des temps d'exposition très longs - jusqu' à 16000 heures - a été utilisée.

Environnement	Taux maximal de production d'hydrogène [ mmol / (m <sup>2</sup> ·a) ]	Taux de production d'hydrogène après 16000 h [ mmol / (m <sup>2</sup> ·a) ]
NaOH pH 12.8	13	0.5-1
KOH pH 12.8	13	0.5-1
Ca(OH) <sub>2</sub> pH 12.8	2	0.5
eau de pores c. Ia pH 13.2	4	1-2
eau de pores c. Ib pH 12.9	2.5	1-2
eau de pores c. II pH 12.5	1	0.5

**Table 1:** Résumé des résultats

Les taux de production d'hydrogène déterminées après 16000 heures (2 ans) sont plus bas que ceux que l'on pourrait déduire d'une étude bibliographique. Toutefois pour la conception d'un dépôt final, il apparaît prudent de choisir la valeur maximale mesurée, à savoir 10 - 13 mmol H<sub>2</sub> / (m<sup>2</sup>·a), vu qu'on ne peut pas encore expliquer le comportement différent des bases mono- et bivalentes.

Mots clefs: corrosion, formation d'hydrogène, eau de pores de ciment, corrosion anaerobique



## 1 Einführung

Die Gasentwicklung aus Abfällen oder anderen Komponenten in einem Endlager spielt eine bedeutende Rolle in der Auslegung und bei den Sicherheitsstudien für Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle. Es zeigt sich [Ref. 1, 2], dass bei diesen Endlagern die Gasentwicklung durch die Korrosion von Eisen und Stahl eine wichtige Rolle spielt. Selbst bei einer Korrosionsrate von 1 bis 0.1  $\mu\text{m}/\text{a}$  ist die Gasentwicklung so hoch, dass spezielle Massnahmen bei den Baumaterialien getroffen werden müssen, um sicherzustellen, dass das Gas aus dem Endlager entweichen kann, ohne eine Erhöhung der Nuklidfreisetzung aus dem Nahfeld zu bewirken.

Um das Baumaterial in diesem Sinne optimieren zu können und für allgemeine Sicherheitsanalysen ist es wichtig, dass die Wasserstoffentwicklung durch die Korrosion von Eisen in einem Endlager möglichst genau bekannt ist. Ebenfalls ist es wichtig, den Korrosionsmechanismus möglichst genau zu kennen, um von Kurzzeitmessungen auf die für ein Endlager relevanten Zeiträume extrapolieren zu können.

## 2 Introduction (in English)

Gas generation from waste or other components of the near-field of a repository is an important issue in the design and safety analysis of deep repositories for low- and intermediate-level waste. It has been shown [ref. 1,2] that gas generation in these repositories is mainly caused by the corrosion of iron and steel, which evolves large quantities of hydrogen. Even at corrosion rates of 1 to 0.1  $\mu\text{m}/\text{a}$ , gas generation will be such, that the other near-field components (backfill, cavern lining) have to be specially designed to ensure, that this gas can leave the near-field without increasing any release of nuclides.

In order to optimize the backfill material composition, and for general safety analysis, it is essential to know as accurately as possible the quantity of hydrogen evolved as well as the corrosion mechanism involved, to allow extrapolation from short-term measurements to repository time-scales.

## 3 Introduction (en français)

La production de gaz par les déchets et autres substances contenues dans un dépôt en grande profondeur est un aspect important de la conception et de l'analyse de sécurité pour un dépôt final pour déchets de basse et moyenne activité. Des études antérieures [réf. 1,2] avaient montré que la production de gaz était essentiellement due à la

corrosion de l'acier non-allié, formant des quantités importantes d'hydrogène. Même des vitesses de corrosion de l'ordre de 1 à 0.1  $\mu\text{m}/\text{a}$  conduisent à la formation de quantités de gaz telles qu'il s'avère nécessaire de prendre des dispositions spéciales au niveau du champ proche (matériau de remplissage, revêtement de la caverne) afin d'assurer une élimination contrôlée des gaz sans que le relâchement des nucléides soit augmenté.

Afin d'optimiser la composition du remblayage et pour l'analyse de sécurité globale, il est important de connaître aussi exactement que possible la quantité d'hydrogène formée ainsi que les mécanismes de corrosion mis en jeu, ceci afin de pouvoir extrapoler les résultats d'essais de courte durée sur la durée de vie du repository.

#### **4 Zielsetzung**

Die vorliegende Arbeit ist eine Ergänzung zum früheren Projekt "Wasserstoffentwicklung durch die Korrosion von Eisen und Stahl in Endlagern für schwach- und mittelaktive Abfälle", wie es im Nagra-Bericht NTB 91-21 beschrieben ist.

Damals wollte man einerseits einen kurzen Überblick geben über die bereits existierende Literatur betreffs Korrosion in alkalischen Medien. Andererseits wurde durch gasvolumetrische Messungen die Korrosionsgeschwindigkeit unter Bedingungen bestimmt, wie sie in einem Endlager erwartet werden.

Die Versuchsdauer der Messreihe mit alkalischen Medien umfasste damals knapp 7000 h (300 Tage). Es zeigte sich, dass diese Messdauer für eine einwandfreie Interpretation der Resultate noch nicht ausreicht.

Ziel der nun abgeschlossenen Zusatzversuche war es, die Messungen um weitere 12 Monate fortzuführen, um noch offene Fragen bezüglich den Korrosionsraten in Zementporenwässern, die die einwertigen Basen NaOH und KOH enthalten, abzuklären.

#### **5 Experimentelles**

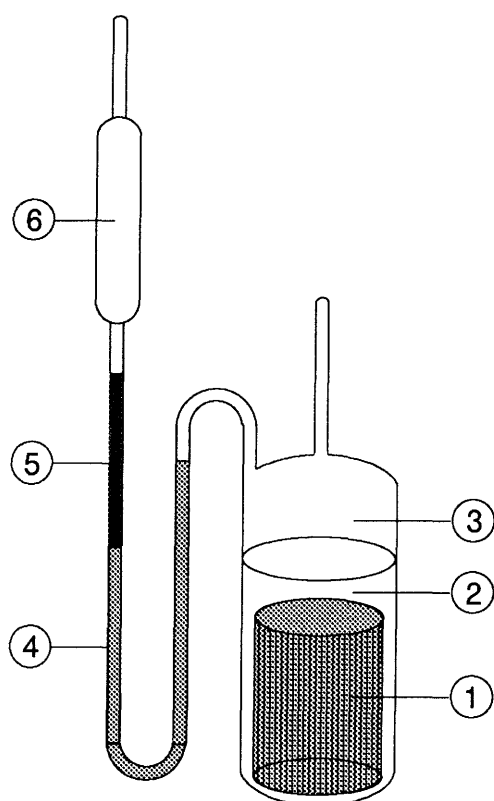
##### **5.1. Messtechnik**

Die Korrosionsraten des Eisens wurden bestimmt durch Messung des sich entwickelnden Wasserstoffs. Hierzu wurde eine volumetrische Messmethode angewendet, wie sie ähnlich von Schikorr 1929 zum ersten Mal beschrieben wurde.

Bei dieser Methode wird der Wasserstoff in einem geschlossenen Glasgefäß, das Eisen und ein entsprechendes Korrosionsmedium enthält, durch Messung des Druckanstiegs bestimmt. Diese Methode erlaubt sehr lange Versuchszeiten, da auch kleinste Wasserstoffverluste praktisch ausgeschlossen werden können.

Die verwendete Glaszelle ist in **Bild 1** gezeigt. Sie besteht aus einer Korrosionskammer und einem quecksilbergefüllten U-Rohr. In die Korrosionskammer werden die Eisenproben (Drahtform ca. 8 cm lang, Durchmesser 0.57 mm) und ein entsprechendes Korrosionsmedium eingefüllt. Das quecksilbergefüllte U-Rohr dient zur Messung des Druckanstiegs in der Korrosionskammer. Ueber der Quecksilbersäule befindet sich etwas Wasser, zur automatischen Korrektur des sich ändernden Wasserdampfdrucks bei veränderter Temperatur.

Das Volumen der Korrosionskammer beträgt ca. 85 - 90 ml; jenes der linken Kammer ca. 27 ml. Der Innendurchmesser des U-Rohrs beträgt 3 mm. Die nutzbare Länge der Quecksilbersäule ist ca. 190 mm. Nach Einsetzen aller Komponenten wurde die Zelle evakuiert und der Versuch gestartet. Die Messtemperatur betrug  $21 \pm 3$  °C. Bei einer entsprechenden Wahl der Probenoberfläche (ca.  $0.08 \text{ m}^2$ ) und des Gasvolumens lassen sich mit dieser Anordnung sehr lange Versuchszeiten erzielen.



**Legende:**

- ① Eisenprobe (Drahtform)
- ② Korrosionsmedium
- ③ Gasraum
- ④ Quecksilbersäule
- ⑤ Wassersäule
- ⑥ Evakuierter Raum

**Bild 1** Glas-Korrosionszelle

Ist die maximale Ausdehnung der Quecksilbersäule erreicht, lässt sich die Messzeit verlängern, indem kontrolliert etwas Gas in die linke Kammer der Apparatur überführt wird, oder aber der Gasraum neu evakuiert wird. Bei den beschriebenen Versuchen wurde die letztere der beiden Methoden angewandt.

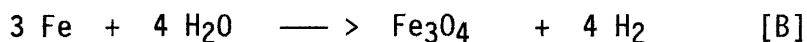
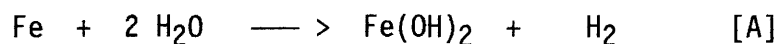
In den Resultaten macht sich dies durch kurze Unstetigkeiten in den Korrosionsraten bemerkbar.

## 5.2 Berechnungen

Vor jedem Versuch wurde das Volumen jeder Zelle einzeln bestimmt. Aufgrund des gemessenen Druckanstiegs und der bekannten Volumina wurde mit Hilfe des Idealen Gasgesetzes die Molzahl des entstandenen Wasserstoffs bestimmt.

$$n_{H_2} = \frac{p \cdot V}{RT} \quad [1]$$

Die Korrosion des Eisens verläuft im Prinzip nach zwei Reaktionen:



Nimmt man an, dass das Eisen zu  $Fe^{2+}$  (gemäss Reaktion [A]) oxidiert wird, entspricht die Molzahl des entstandenen Wasserstoffes derjenigen des korrodierten Eisens,

$$n_{H_2} = n_{Fe^{2+}} \quad [2]$$

womit bei bekannter Eisenoberfläche direkt auf den Korrosionsabtrag geschlossen werden kann.

Umrechnungsfaktoren:

$$\begin{array}{l} \text{Formel A : } 1 \text{ mmol } H_2/m^2 = 7.1 \text{ nm Fe (*)} \\ \text{Formel B : } 1 \text{ mmol } H_2/m^2 = 5.3 \text{ nm Fe} \\ \quad \quad \quad 1 \text{ mmol } H_2/m^2 = 22.4 \text{ ml } H_2/m^2 \end{array}$$

(\*) wurde für die Auswertung der Resultate benutzt

Anmerkung: Detaillierte Angaben zur Messtechnik und zur Berechnung der Korrosionsraten können im Nagra-Bericht NTB 91-21 nachgelesen werden.

### 5.3 Versuchsprogramm

#### 5.3.1 Medien

Als Versuchsmedien dienen 3 alkalische (synthetische) Zementporenwässer, wie sie in einem Endlager auftreten können. Die Porenwässer entsprechen 3 verschiedenen Alterungsstufen, da erwartet wird, dass die freien Alkali-Ionen  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  im Laufe der Zeit vom Grundwasser ausgeschwemmt werden. Die chemische Zusammensetzung basiert auf Modellrechnungen.

Porenwasser	KOH	NaOH	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{CaSO}_4$	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{CaCO}_3$	$\text{Mg(OH)}_2$
ZPW Ia pH 13.2	180	114	3	-	sat	sat	sat
ZPW Ib pH 12.9	60	34	3	-	sat	sat	sat
ZPW II pH 12.5	3	-	-	3	sat	sat	sat

**Tabelle 2** Chemische Zusammensetzung der Zementporenwässer Ia/Ib und II [mMol/l]

Neben diesen Zementporenwässern wurden Versuche mit Lösungen der reinen Komponenten durchgeführt, um den Effekt der Ionen einzeln untersuchen zu können.

$\text{Ca(OH)}_2$	gesättigte $\text{Ca(OH)}_2$ -Lsg.	pH 12.8
NaOH	0.1N NaOH-Lsg. verdünnt auf	pH 12.8
KOH	0.1N KOH -Lsg. verdünnt auf	pH 12.8

**Tabelle 3** Chemische Zusammensetzung der Alkali-Lösungen

#### 5.3.2 Probenmaterial

Die Tests wurden mit einem Reineisendraht durchgeführt (Fe-Gehalt mind. 99 %, C-Gehalt 0.91 %). Die Länge betrug ca. 8 cm, der Durchmesser 0.57 mm.

## 6 Resultate

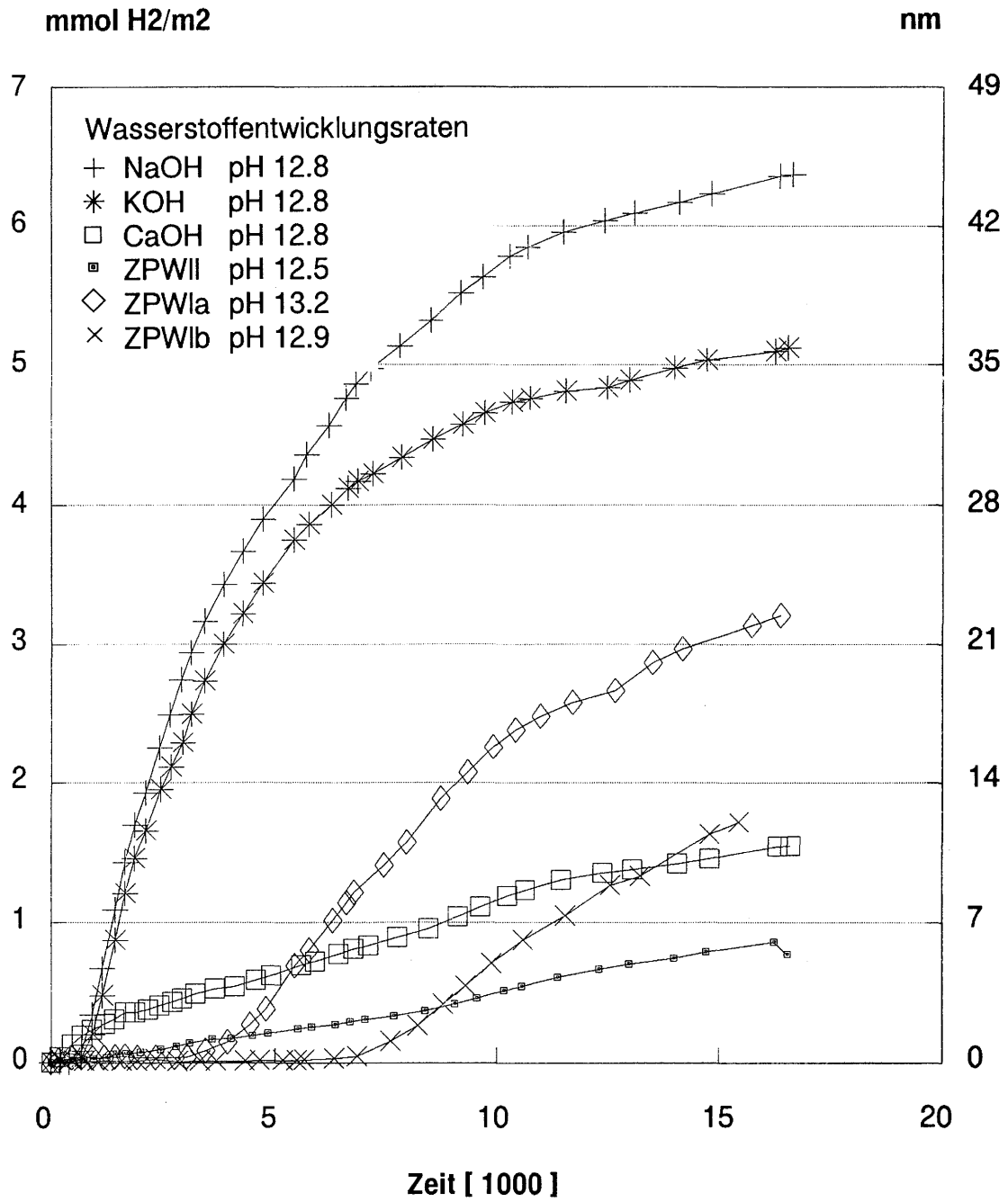
Die Resultate der durchgeführten Versuche sind sowohl als kumulative Werte der Wasserstoffentwicklung, als auch in Form von deren Ableitung, d.h. als Wasserstoffentwicklungsraten, dargestellt.

Die äquivalenten Korrosionsabträge sind ebenfalls angegeben (direkt berechnet aus der Gasentwicklung). Alle dargestellten Kurven sind Durchschnittswerte aus drei identischen Messungen. Die durchschnittliche Reproduzierbarkeit beträgt  $\pm 10\%$ . Die Empfindlichkeit der Methode wurde früher durch Blindversuche überprüft und beträgt bei langen Versuchszeiten ca.  $0.1 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ .

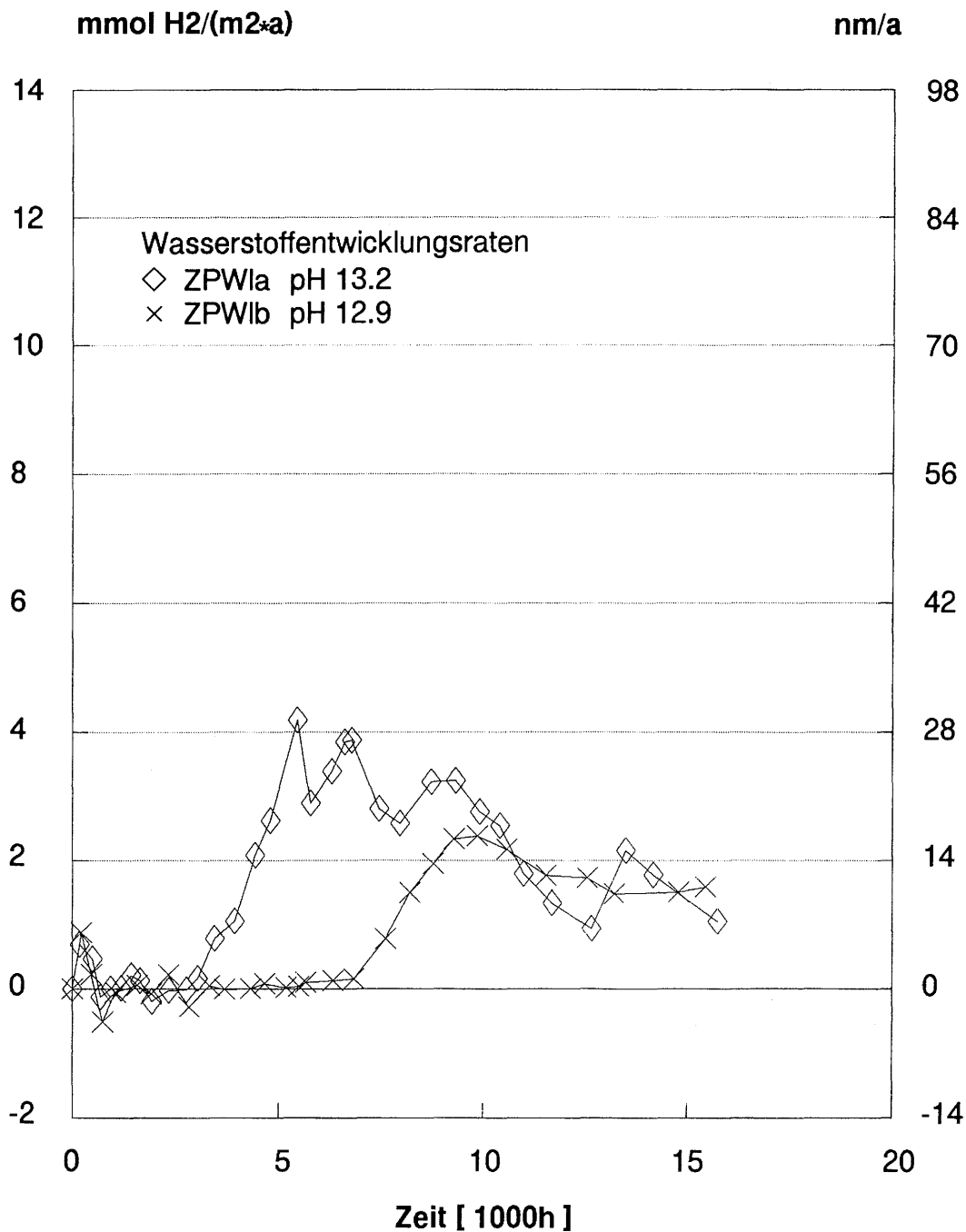
In Bild 2 ist die kumulative Wasserstoffentwicklung der 6 verschiedenen Lösungen dargestellt. Obwohl der pH-Wert der Medien ähnlich ist, zeigen sich recht unterschiedliche Werte.

Neben dem pH-Wert spielt somit die chemische Zusammensetzung der Korrosionsmedien eine wichtige Rolle bei der Wasserstoffentwicklung.

In Bild 3, 4 und 5 sind die Resultate in Form der abgeleiteten Wasserstoffentwicklungsraten dargestellt.

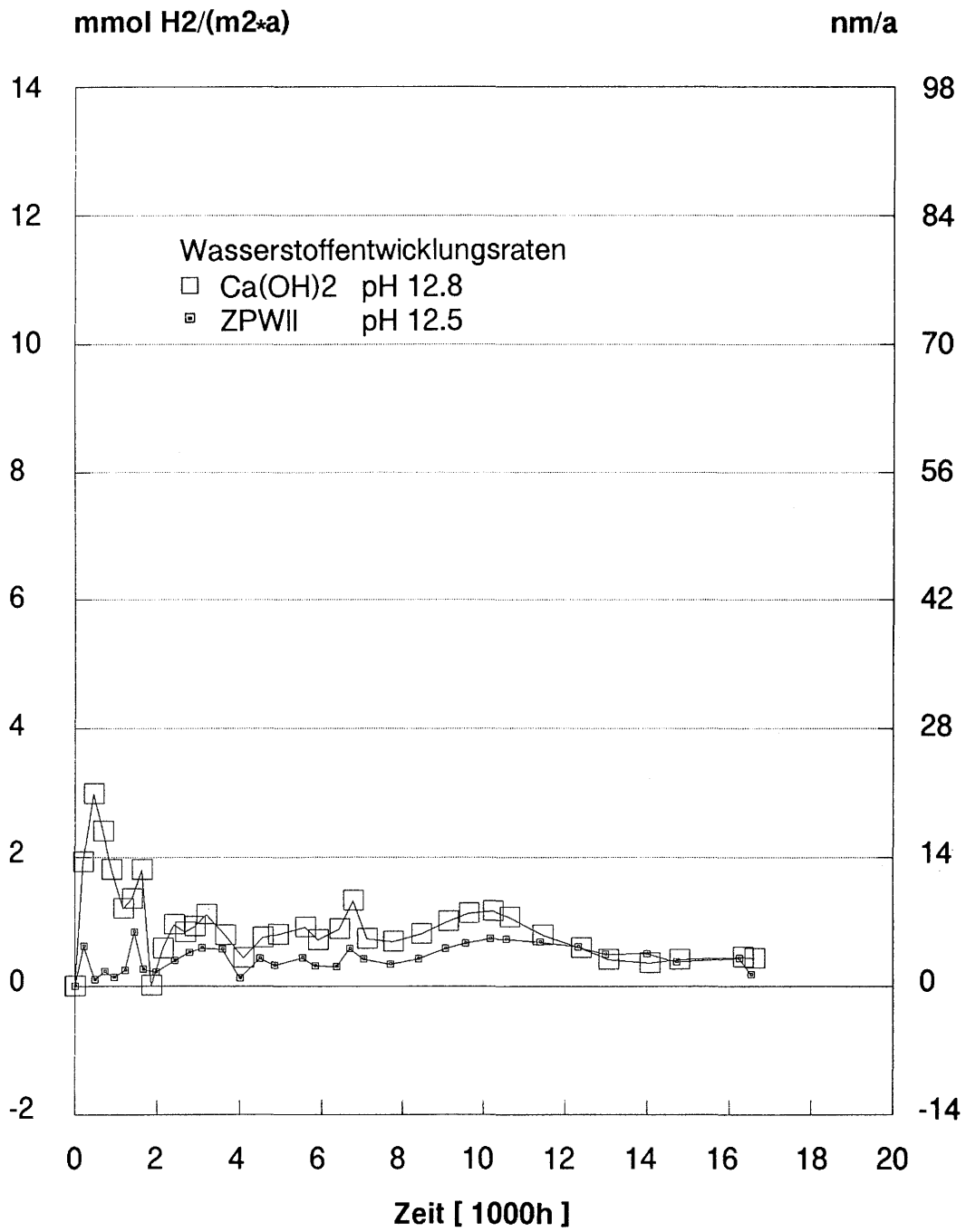


**Bild 2** Kumulative Wasserstoffentwicklung in alkalischen Medien

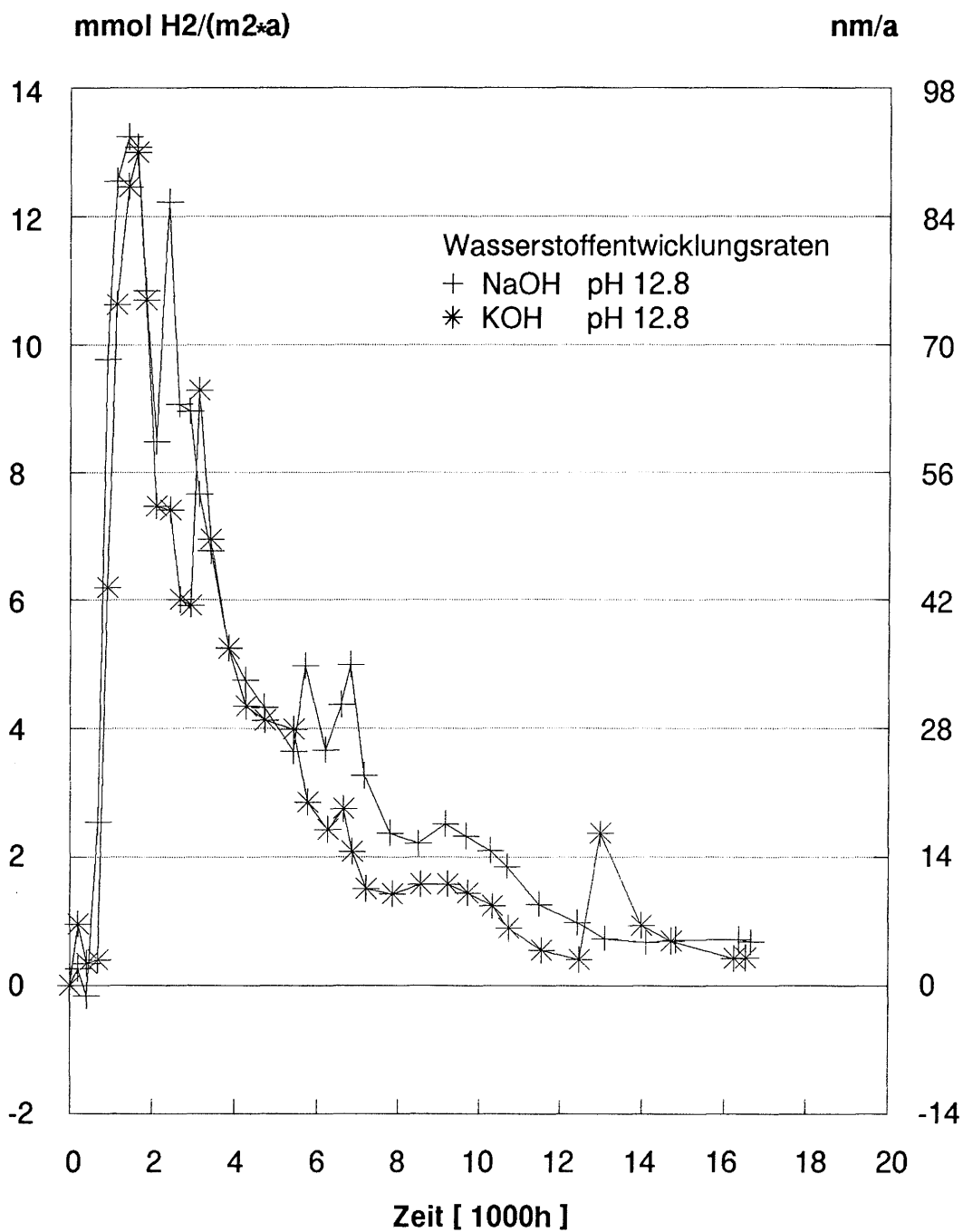


**Bild 3** Medien enthalten ein- und zweiwertige Basen





**Bild 4** Medien enthalten hauptsächlich 2-wertige Basen



**Bild 5** Medien enthalten nur einwertige Basen

Aufgrund des Kurvenverlaufs der oben dargestellten Wasserstoffentwicklungsdaten, lassen sich die Medien in 3 Gruppen einteilen:

**1) Medien mit den einwertigen Basen NaOH, KOH**

In diesem Falle setzt nach einer verhältnismässig kurzen Inkubationszeit eine relativ starke Korrosion ein ( $12 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), die nach ca. 2000 h ihren Höchstwert erreicht, anschliessend allmählich absinkt und nach 14000 h zwischen  $0.5$  und  $1 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$  liegt.

**2) Medien, die hauptsächlich die zweiwertige Base  $\text{Ca(OH)}_2$  [Ca(OH)<sub>2</sub>, ZPW II] enthalten**

Hier zeigt sich keine Inkubationsphase. Von Beginn an ergibt sich eine relativ konstante Wasserstoffentwicklungsrate, die um  $1 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$  liegt.

**3) Medien, die ein- und zweiwertige Basen (ZPW Ia u. Ib) enthalten**

Diese Medien liegen nicht nur in der chemischen Zusammensetzung, sondern auch beim Korrosionsverhalten zwischen den beiden bisher genannten Gruppen. Sie zeigen eine wesentlich längere Inkubationszeit als die Medien mit den einwertigen Basen.

In diesem Stadium liegen die Korrosionswerte noch unterhalb jener der hauptsächlich  $\text{Ca(OH)}_2$ -haltigen Medien. Nach 3000 resp. 7000 h ergibt sich jedoch, wie bei den einwertigen Basen, ein plötzlicher Anstieg der Wasserstoffentwicklung auf Werte von  $2 - 4 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , der anschliessend langsam wieder abnimmt. Nach 14000 h liegt die Korrosion noch leicht über jener von NaOH und KOH.

Aufgrund dieser Resultate kann angenommen werden, dass die Eisenkorrosion unter alkalischen, anaeroben Bedingungen hauptsächlich von den Komponenten NaOH, KOH und  $\text{Ca(OH)}_2$  abhängt.

Bei den einwertigen Basen KOH, NaOH ergibt sich eine Inkubationszeit, der eine relativ starke Wasserstoffentwicklung folgt.

Andererseits ergibt sich mit der zweiwertigen Base keine Inkubationszeit, dafür eine von Beginn an konstante Korrosionsrate. Offenbar ist  $\text{Ca(OH)}_2$  an der Bildung einer Deckschicht beteiligt, die die Korrosionsgeschwindigkeit des Eisens reduziert. Auch bei den Zementporenwässern zeigt sich dieser Einfluss der Einzelkomponenten  $\text{Ca(OH)}_2$ , NaOH und KOH. Alle diese Lösungen sind mit  $\text{Ca(OH)}_2$  gesättigt. Im Falle dass NaOH oder KOH vorhanden ist (ZPW Ia + Ib), zeigen die Wasserstoffentwicklungskurven die typischen Merkmale der einwertigen Basen (Inkubationszeit und anschliessende Wasserstoffentwicklung). Im Falle

dass nur  $\text{Ca(OH)}_2$  vorhanden ist (ZPW II), ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der reinen  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung.

Interessant ist, dass nach ca. 15000 h alle Korrosionswerte, unabhängig von der chemischen Zusammensetzung der Lösung, in einer ähnlichen Grössenordnung liegen ( $1 - 2 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ).

Medium	maximale $\text{H}_2$ -Entwicklungsrate [ $\text{mmol} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ]	$\text{H}_2$ -Entwicklung nach 16000 h [ $\text{mmol} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ]
NaOH pH 12.8	13	0.5-1
KOH pH 12.8	13	0.5-1
$\text{Ca(OH)}_2$ pH 12.8	2	0.5
Zementporenw. Ia pH 13.2	4	1-2
Zementporenw. Ib pH 12.9	2.5	1-2
Zementporenw. II pH 12.5	1	0.5

**Tabelle 4: Zusammenfassung der Resultate**

## 7 Diskussion der Resultate

Das wesentliche Resultat dieser Arbeit ist die Bestätigung der im Nagra-Bericht NTB 91-21 geäusserten Vermutung, dass beim Zementporenwasser Ib mit einem Ansteigen der Wasserstoffentwicklung zu rechnen ist. Damals war unerklärlich, warum bei diesem Medium keine Wasserstoffentwicklung einsetzt, obwohl schon damals die Analogie zum Verhalten der einwertigen Basen erkannt wurde.

Der Mechanismus für das unterschiedliche Verhalten der ein- und zweiwertigen Basen ist jedoch weiterhin unklar. Es ist nicht bekannt, welcher Mechanismus zur Inkubationszeit bei den einwertigen Basen führt und weshalb ein plötzlicher, verhältnismässig starker Angriff einsetzt. Obwohl nach 15000 h alle Medien eine Korrosionsgeschwindigkeit von  $1 - 2 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$  zeigen, sollte man (wie schon im NTB 91-21 erwähnt) etwa konservativerweise eher von einer Korrosionsrate von  $10 \text{ mmol H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$  ausgehen. Dieses Ergebnis wurde zeitweise auch bei einwertigen Basen erhalten.

## 8 Referenzen

[1] Zuidema P., Van Dorp F., Knecht B., "Gas formation and Release in Repositories for Low- and Intermediate Level Waste: An Issue of Potentially Decisive Importance". Publiziert in Proc. Int. Symp. on the Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, Paris, 9 - 13 Oct. 1989, Paris OECD 1990.

[2] Kreis P.: "Hydrogen Evolution from Corrosion of Iron and Steel in Intermediate Level Waste Repositories" und darin enthaltene Referenzen. Technischer Bericht NTB 91-21. Nagra, Wettingen, 1991.