



DECKBLATT

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
		N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N
EU 124.1	9K		---	MR	RB	0013	00

Titel der Unterlage: Redoxpotential und pH-Bestimmungen an Aus- lauglösungen zementierter Abfallprodukte im geologischen Milieu Konrad, RCM 01986	Seite:
	II.
	Stand: Juni 1986

Ersteller: TU-München	Textnummer:
--------------------------	-------------

Stempelfeld:

PSP-Element TP..9K./21285	zu Plan-Kapitel: 3.9
---------------------------	----------------------

	PL	PL

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.

Revisionsblatt



EU 124.1	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
	9K		---	MR	RB	0013	00

Titel der Unterlage: Redoxpotential und ph-Bestimmungen an Auslauglösungen zementierter Abfallprodukte im geologischen Milieu Konrad, RCM 01986	Seite: II.
	Stand: Juni 1986

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

Auftragnehmer: Technische Universität München
Institut für Radiochemie

Projektleiter:



Bearbeiter:



Thema: Redoxpotential und pH-Bestimmungen an Auslaug-
lösungen zementierter Abfallprodukte im geolo-
gischen Milieu Konrad

Berichtszeitraum: 1.11.1985 - 30.6.1986

München, Juni 1986

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

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 Einleitung	1
2 Probencharakterisierung	1
2.1 Probenzusammensetzung	2
3 Experimentelle Durchführung	3
3.1 Probenvorbereitung	3
3.2 pH-Messungen	4
3.3 Eh-Messungen	5
4 Ergebnisse	5
5 Abbildungen	8
6 Tabellen	17

1 Einleitung

Zum Planfeststellungsverfahren der PTB für das Endlager für radioaktive Abfälle, Schachanlage Konrad wurden Versuche zur Abschätzung von Störfallrisiken durchgeführt. Als Störfall wird ein "Absaufen" des Grubengebäudes nach der Stilllegung des Endlagers angenommen. Hierbei stellt sich die Frage, welche pH- und Eh-Werte sich im Wasser des Grubengebäudes einstellen werden. Diese Parameter haben einen großen Einfluß auf die Löslichkeit verschiedener Radionuklide und somit auf die weitere Ausbreitung der Radionuklide über das Grubengelände hinaus.

Bei der Lagerung der Abfälle wird so verfahren, daß die radioaktiven Abfälle in Zement eingegossen werden und diese Zementblöcke in die Stollen eingelagert werden. Obriubleibende Hohlräume werden mit Versatzmaterial verfüllt. Eh und pH des Wassers können somit durch Auslaugen von Zement, Versatzmaterial sowie der Wände des Grubengebäudes beeinflußt werden.

Die nachfolgenden Untersuchungen haben zum Ziel Anhaltspunkte dafür zu liefern, inwieweit pH und Eh des Wassers von Zement und Versatzmaterial beeinflußt werden.

2 Probencharakterisierung

Das für die Versuche verwendete Versatzmaterial wurde 1983 von der FUB geliefert. Bei dem Versatzmaterial handelt es sich um Eisenoolith aus der Schachanlage Konrad, einer Mischung des beim Vortrieb der Strecken 670, 402 und 360 gewonnenen Materials (Stratigraphische Einstufung: System Jura; Serie Malm). Für die Vorversuche (Tab. 7, Abb. 1) wurde Portlandzement PZ 35 F verwendet. Für die weiteren Versuche wurden die zementierten Abfallsimulate EZWOK 4, E 111, E 114 und E 21 verwendet. Die Probe E 21 wurde im November 1985 zusammen mit Angaben über die Zusammensetzung der Probe (Tab. 2) sowie der Zusammensetzung der Zemente (Tab. 1) von der INE-KfK geliefert. Die zementierten Ab-

fallsimulate EZWOK 4, E 111 und E 114 wurden im November 1985 von der Fa. NUKEM zur Verfügung gestellt, zusammen mit Angaben über den Abfallkonzentratanteil der zementierten Proben (Tab. 2) und der Zusammensetzung der Abfallsimulate (Tab. 3 bis 5). Als Wasser wurde für die Vorversuche das Str.670-Wasser eingesetzt. Für die anderen Versuche wurde stattdessen das Ort-300-Wasser verwendet, um eine Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse durch leicht unterschiedliche Wässer ausschließen zu können. Diese beiden Wässer werden als repräsentativ für die im Bereich des Grubengebäudes auftretenden Wässer angesehen. Die Analysendaten der beiden Wässer sind in Tab. 6 aufgetragen.

2.1 Probenzusammensetzung

Bei der Auswahl der Probenzusammensetzung stellt sich die Frage ob zusätzlich zu Zement und Versatzmaterial das umgebende Oxfordgestein berücksichtigt werden sollte.

Von der PTB wurde die umgebende Raumbofläche mit $1.1 \times 10^6 \text{ m}^2$ angegeben. Für die angegebenen $1.4 \times 10^9 \text{ kg}$ Versatzmaterial wurde eine Oberfläche von $5 \times 10^{10} \text{ m}^2$ abgeschätzt. Aufgrund dieser Abschätzung wurde auf eine Beimengung von umgebenden Oxfordgesteinen zu dem Versatzmaterial verzichtet, zumal es sich bei dem Versatzmaterial um Oxfordgestein handelt.

Abschätzungen der PTB:

Zementprodukte und Behälter:	0.9×10^9	kg
Versatzmaterial:	1.4×10^9	kg
Auflockerungszone:	1.1×10^9	kg
Versatzmaterialoberfläche:	5×10^{10}	m^2
Raumbofläche:	1.1×10^6	m^2
Wasservolumen:	10^9	l

Das Verhältnis von Zementprodukt zu Versatzmaterial liegt nach dieser Abschätzung bei 1/1.6 bzw. 61 gew.% Versatzmaterial. Bei Einbeziehung der Auflockerungszone liegt das Verhältnis von Zementprodukt zu Versatzmaterial, wenn man das umgebende Oxfordgestein der Auflockerungszone dem Versatzmaterial zurechnet, bei 74 gew.% Versatzmaterial. Untersucht wurden bei den Vorversuchen Proben mit einem Gewichtsverhältnis Zement zu Versatz von:

	Mischverhältnis						
Zement	0	5	10	25	50	75	100
Versatz	100	95	90	75	50	25	0

Für die weiteren Versuche wurden aufgrund der Ergebnisse der Vorversuchsreihe etwas andere Probenzusammensetzungen gewählt um den pH/Eh-Änderungsbereich besser zu dokumentieren. Gewichtsverhältnis von zementierten Proben zu Versatzmaterial bei den Versuchen mit EZWOK 4, E 111, E 114 und E 21:

	Mischverhältnis							
zementierte								
Probe	0	0.3	3	6	10	20	50	100
Versatz	100	99.7	97	94	90	80	50	0

Das Verhältnis von Wasser im Grubengebäude zu zementierte Proben plus Versatzmaterial wird mit 0.44 l/kg abgeschätzt. Die Versuche konnten mit einem derartigen V/m-Verhältnis nicht durchgeführt werden, da für die pH- und Eh-Messungen etwas überstehendes Wasser benötigt wird. Bei einem V/m-Verhältnis von 0.44 werden die Proben lediglich angefeuchtet. Es wurde daher ein V/m-Verhältnis von 1 gewählt.

3 Experimentelle Durchführung

3.1 Probenvorbereitung

Zur Beschleunigung der Auslaugreaktion und damit zur Erstellung des

Lösegleichgewichts im kürzeren Versuchszeitraum wurden die gelieferten zementierten Probenblöcke mit einem Backenbrecher zerkleinert und anschließend in einer Kugelmühle gemahlen (Korngröße <0.5 mm). Das Versatzmaterial wurde in der gelieferten Form (Korngröße <2 mm) verwendet. Pro Probe wurden 50 g Feststoff in 100 ml PE-Weithalsflaschen eingewogen. Von jeder Mischung wurden 2 Parallelproben hergestellt. Die Proben wurden nach dem Einwiegen in eine Inertgasbox eingeschleust und mit jeweils 50 ml Grundwasser versetzt. Die Inertgasbox wurde während der Dauer der Experimente ständig mit einer Gasmischung von Argon mit 1 % CO_2 gespült. Die Beimischung von 1 % CO_2 zu dem Inertgas dient dazu den CO_2 -Partialdruck im Grubengebäude zu simulieren. Die Proben wurden in dieser Box gelagert. Die Eh- und pH-Messungen wurden ebenfalls in der Box ausgeführt, sodaß die Proben nach dem Einwiegen nicht mehr mit Luft in Berührung kamen.

3.2 pH-Messungen

Zur Messung wurde eine kombinierte pH-Glaselektrode vom Typ "Ross", Modell Nr. 81-02 der Fa. Colora/Lorch eingesetzt. Die Eichung der Elektrode wurde mit folgenden technischen Pufferlösungen (Merck) durchgeführt:

pH der Pufferlösung bei 20 °C (± 0.02)	Merck-Nr.
2.00	9433
4.00	9435
5.00	9436
7.00	9439
9.00	9461
10.00	9438

Die Eichung wurde in Form einer absoluten Spannungsmessung durchgeführt. Aus den gemessenen Potentialen und den zugehörigen pH-Werten der Standardlösungen wurden die Eichgerade für die pH-Elektrode per

linearer Regression berechnet. Für die pH-Bestimmung in den Proben wurden entsprechend mit den gemessenen Potentialen aus der Gleichung der Eichgeraden die pH-Werte berechnet.

3.3 Eh-Messungen

Die Messungen wurden mit Redox-Einstabmeßketten vom Typ "Pt-4805" der Fa. Ingold durchgeführt. Diese Einstabmeßkette enthält eine Pt-Elektrode sowie eine Ag/AgCl Bezugselektrode, weswegen zur Bestimmung der Eh-Wertes einer Lösung zu dem gemessenen Potential das Standardpotential der Bezugselektrode (210 mV bei 20 °C) hinzuaddiert werden muß. Vor der Messung wurde die Elektrode durch polieren der Oberfläche mit Schleifpaste gereinigt. Anschließend wurde die Elektrode für ca. 30 sek. in eine 10%ige Na_2SO_3 -Lösung zur Entfernung der Oxidschicht eingetaucht und danach mit bidestilliertem Wasser abgespült. Aufbewahrt wurde die Elektrode in 3 M KCl. Die Oberprüfung der Elektrode erfolgte mit Redoxpufferlösungen (Ingold) die einen ähnlichen pH-Wert hatten wie die zu messenden Wässer. Gemessen wurde nach 10 min, 1 h und 2 h. Sofern der Meßwert nach 2 h von dem nach 1 h abwich, wurde die Messung wiederholt.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Tabellen 7 bis 11 sowie in den Abbildungen 1 bis 9 dargestellt. Abb. 1 zeigt die gemessenen pH- und Eh-Werte der Proben der Vorversuchsreihe mit dem Zement PZ 35 F in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der festen Phase der Proben, nach Ansetzen der Proben (Abb. 1a) und nach 9 Wochen Kontaktzeit (Abb. 1b). Die pH-Werte nehmen mit zunehmendem Zementanteil zu, die Eh-Werte nehmen mit zunehmendem Zementanteil ab. Bei der Probe mit 100 % Zementanteil wurde anfangs ein pH-Wert von 11.19 und ein Eh-Wert von +237 mV gemessen. Diese Werte änderten sich im Laufe von 9 Wochen zu pH = 12.22 und Eh = +48 mV. Ein deutlicher Einfluß des Versatzmaterials auf Eh und pH des Wassers macht sich ab einem Versatzmaterialanteil von 75 % und darüber bemerkbar.

Die Meßergebnisse der Versuche mit der Zementproduktprobe EZWOK 4 sind in Tabelle 8 aufgetragen. Die Abb. 2a zeigt die pH- und Eh-Werte dieser Versuchsreihe in Abhängigkeit von der Probenzusammensetzung nach Ansatz der Proben, Abb. 2b nach 23 Wochen Kontaktzeit. In Abb. 3a sind die pH-Werte und in Abb. 3b die Eh-Werte von Proben mit verschiedenen Mischungsverhältnissen Zementprodukt/Versatzmaterial in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Der Einfluß des Versatzmaterials auf pH und Eh der Wässer ist bereits bei den Proben mit 50 % Anteil an Versatzmaterial deutlich. Die pH-Werte zeigen mit der Zeit nur geringe Änderungen. Die pH-Werte der Proben mit 6 % Zementproduktanteil und darüber sind gegenüber dem Anfangs-pH leicht gestiegen. Bei den Proben mit weniger Zementproduktanteil leicht gesunken. Die Eh-Werte nehmen bei den Proben die Zement enthalten mit der Zeit ab. Die größte Abnahme des Eh-Wertes erfolgt bei den Proben mit 50 % und 100 % Zementproduktanteil innerhalb der ersten 4 Wochen. Nach 11 Wochen bleibt der Eh-Wert in etwa konstant. Der Eh-Wert der Probe mit 20 % Zementproduktanteil nimmt in den ersten 4 Wochen nur leicht ab. Zwischen 11 und 17 Wochen erfolgt dann eine starke Abnahme um 300 mV, danach bleibt der Eh-Wert fast konstant. Der Eh-Wert der Probe mit 10 % Zementproduktanteil nimmt kontinuierlich ab, wobei die stärkste Abnahme zwischen 11 und 23 Wochen Kontaktzeit stattfindet. Der Eh-Wert der Probe mit 6 % Zementproduktanteil nimmt in den ersten 17 Wochen kontinuierlich von 240 mV auf 164 mV ab und zwischen 17 und 23 Wochen dann stärker von 164 mV auf 2 mV.

Die Versuchsreihe mit der Zementproduktprobe E 111 (Tabelle 9, Abb. 4 und 5) zeigt, daß sich die pH-Werte mit der Zeit nur wenig ändern (Abb. 5a). Bei den Proben mit einem Zementproduktanteil von 10 % bis 100 % stellt sich mit der Zeit in etwa der gleiche Eh-Wert ein (Abb. 4b und 5b), wie es tendentiell auch bei der Probenreihe mit EZWOK 4 zu beobachten ist.

Ein ähnliches Verhalten wie die Versuchsreihe mit E 111 zeigt auch die Versuchsreihe mit dem Zementprodukt E 114 (Tabelle 10, Abb. 6 und 7), bei der sich die pH-Werte ebenfalls nur wenig mit der Zeit ändern

(Abb. 7a) und die Eh-Werte für Proben mit einem Zementproduktanteil zwischen 10 % und 100 % in etwa den gleichen Wert aufweisen. Im Gegensatz zur Versuchsreihe mit E 111 nehmen die Eh-Werte bei dieser Versuchsreihe im Laufe der Zeit ab.

Die Versuchsreihe mit dem Zementprodukt E 21 (Tabelle 11, Abb. 8 und 9) zeigt ähnliche Ergebnisse wie die Versuchsreihe mit E 114.

Zusammenfassend kann man schließen, daß die Proben mit NaNO_3 -Konditionierung (EZWOK 4 und E 21) eine starke Eh-Änderung vorweisen (Tabellen 8 und 11), viel mehr als die reine Zementprobe ohne Konditionierung mit Abfallflüssigkeit (vgl. Tabelle 7). Die sulfat- und borathaltigen Proben (Tabellen 9 bzw. 10) zeigen schwächere Eh-Änderungen.

Die durch die Konditionierung bewirkte Eh-Änderung, in Bezug auf den zur Konditionierung des Wassers verwendeten Zement, bzw. in Bezug auf das verwendete Zementprodukt, nimmt in folgender Reihenfolge ab:

Nitratbasis > Boratbasis > Sulfatbasis > Reinzement

Auf die pH-Änderung hat die Art des Zements keinen wesentlichen Einfluß.

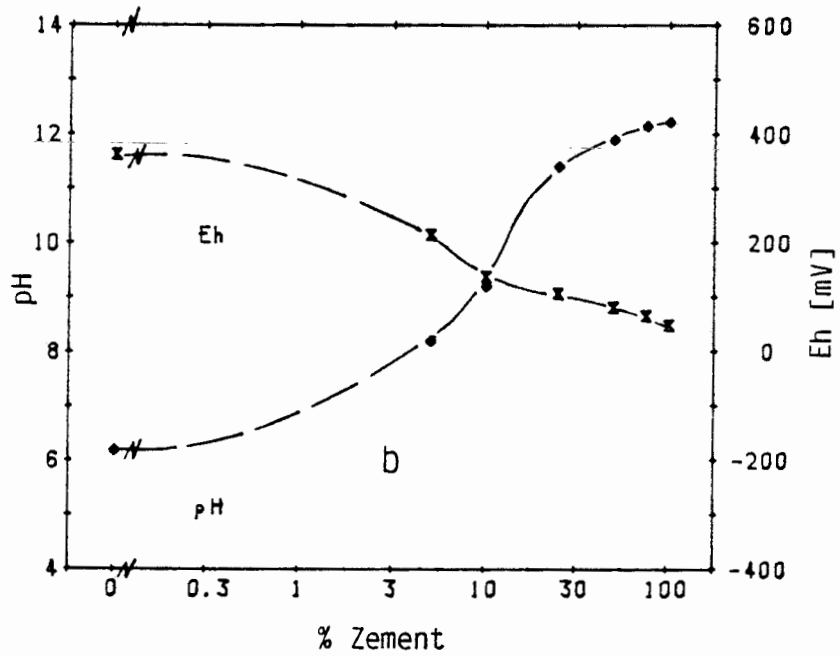
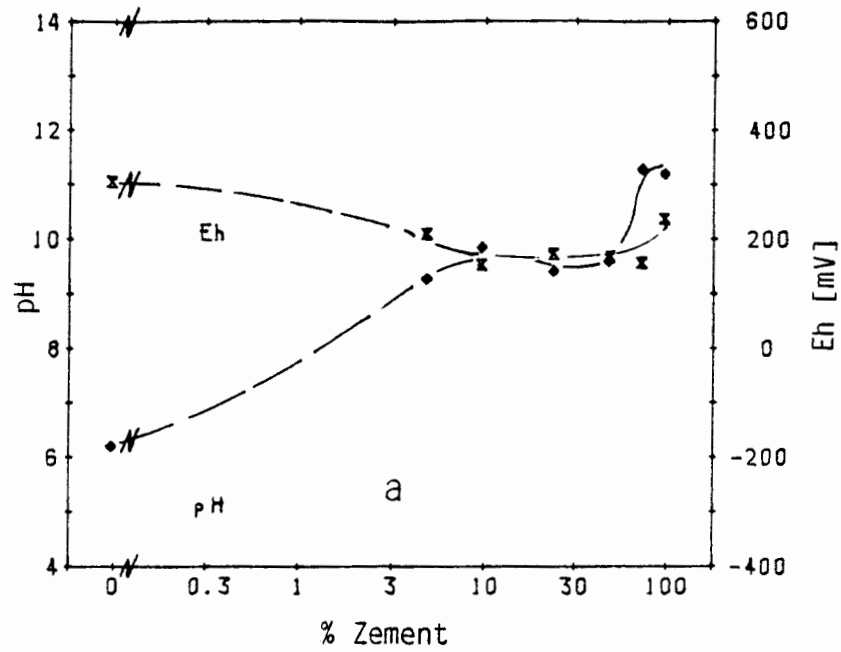


Abb. 1: Probe PZ 35 F / Versatzmaterial / Str.670-Wasser

Eh-, pH-Werte in Abhängigkeit von der Probenzusammensetzung

a) nach dem Ansatz

b) nach 9 Wochen

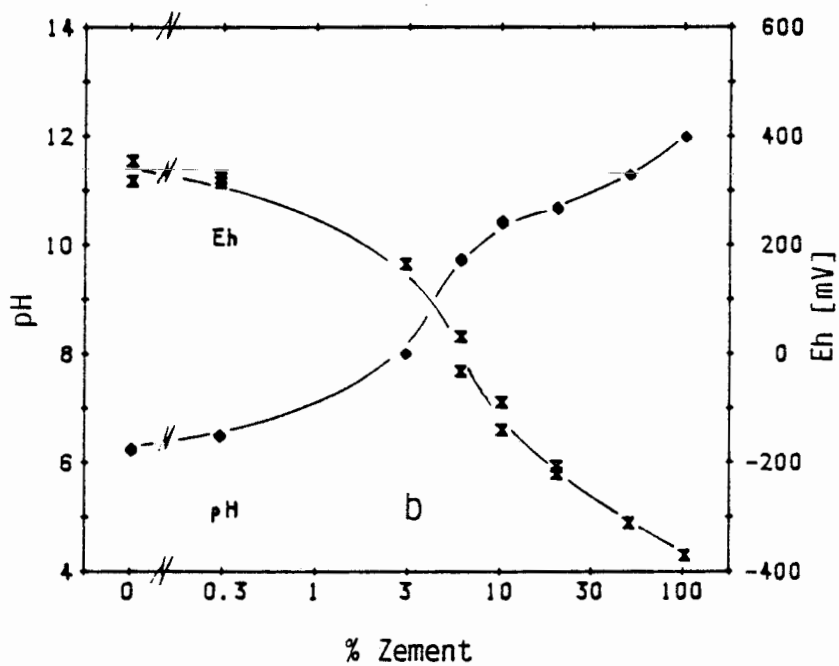
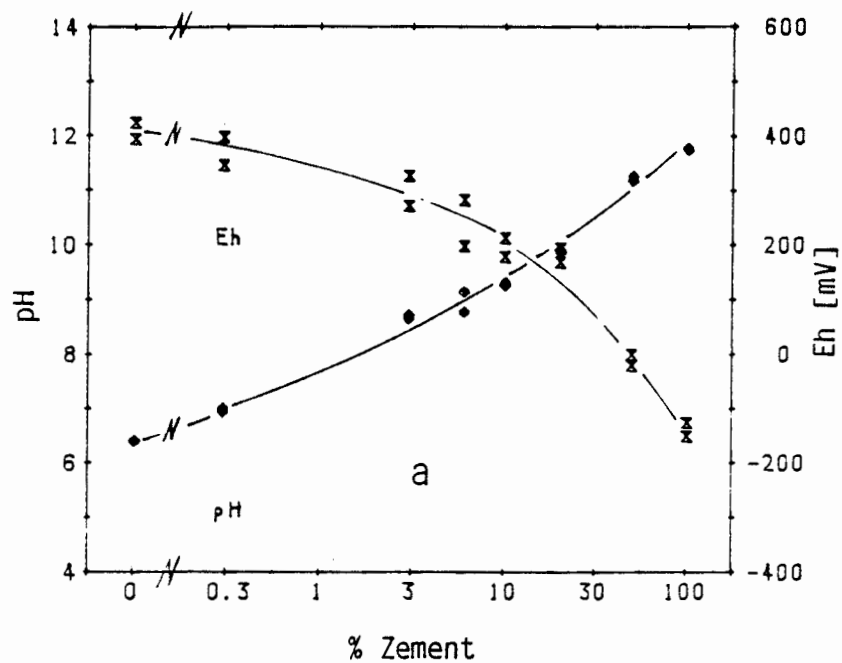


Abb. 2: Probe EZWOK 4 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte in Abhängigkeit von der Probenzusammensetzung

a) nach dem Ansatz

b) nach 23 Wochen

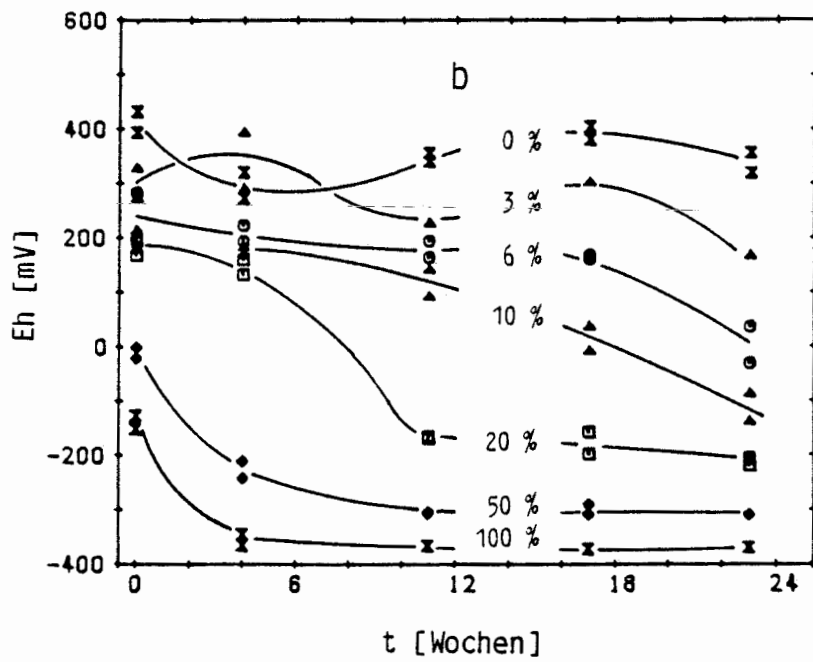
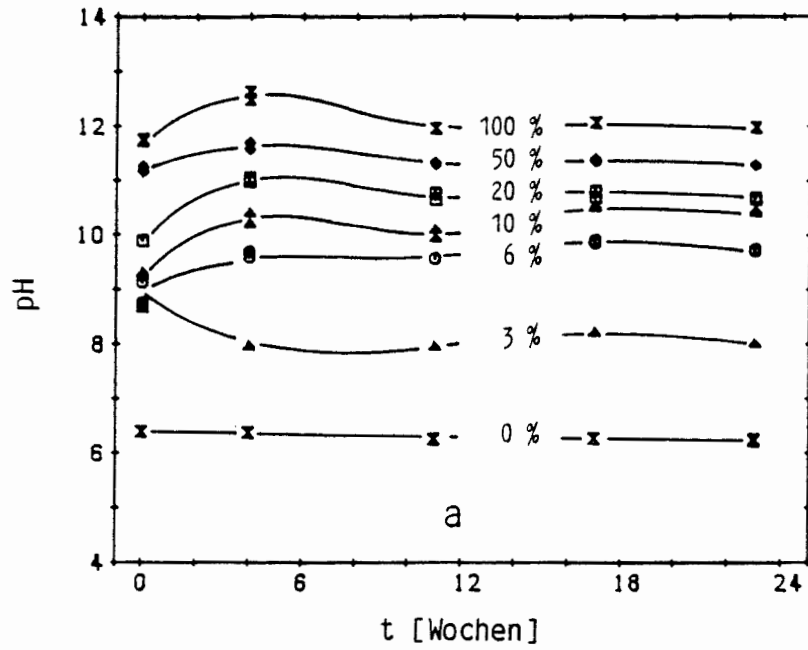


Abb. 3: Probe EZWOK 4 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte für verschiedene Probenzusammensetzungen
in Abhängigkeit von der Zeit (Angaben der Probenzusammensetzung
in % Zement)

a) pH-Werte

b) Eh-Werte

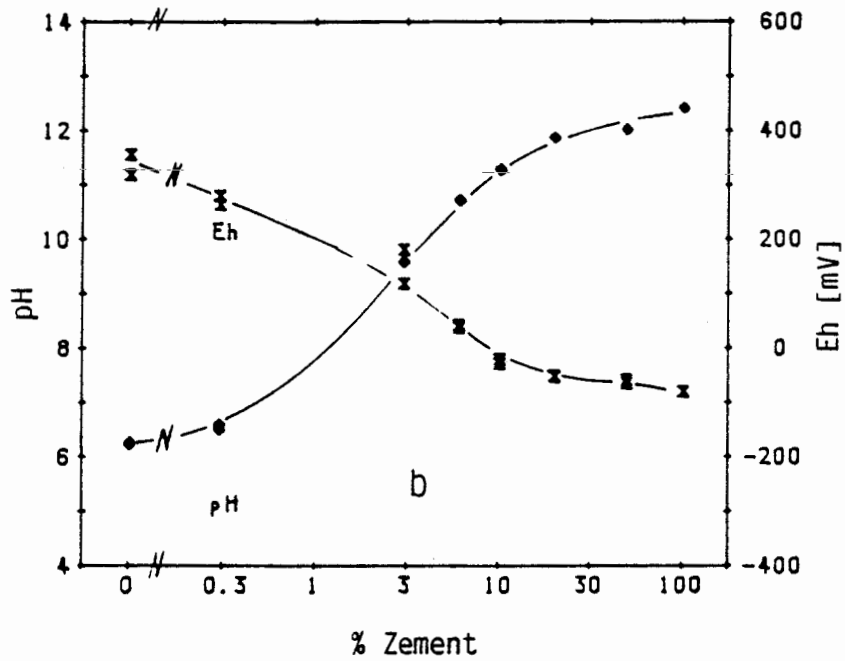
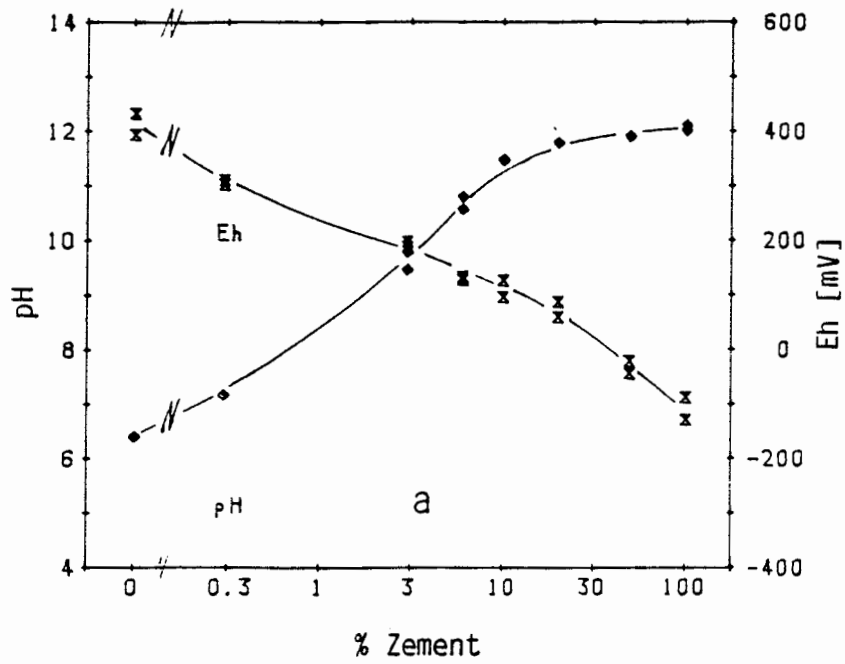


Abb. 4: Probe E 111 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte in Abhängigkeit von der Probenzusammensetzung

a) nach dem Ansatz

b) nach 23 Wochen

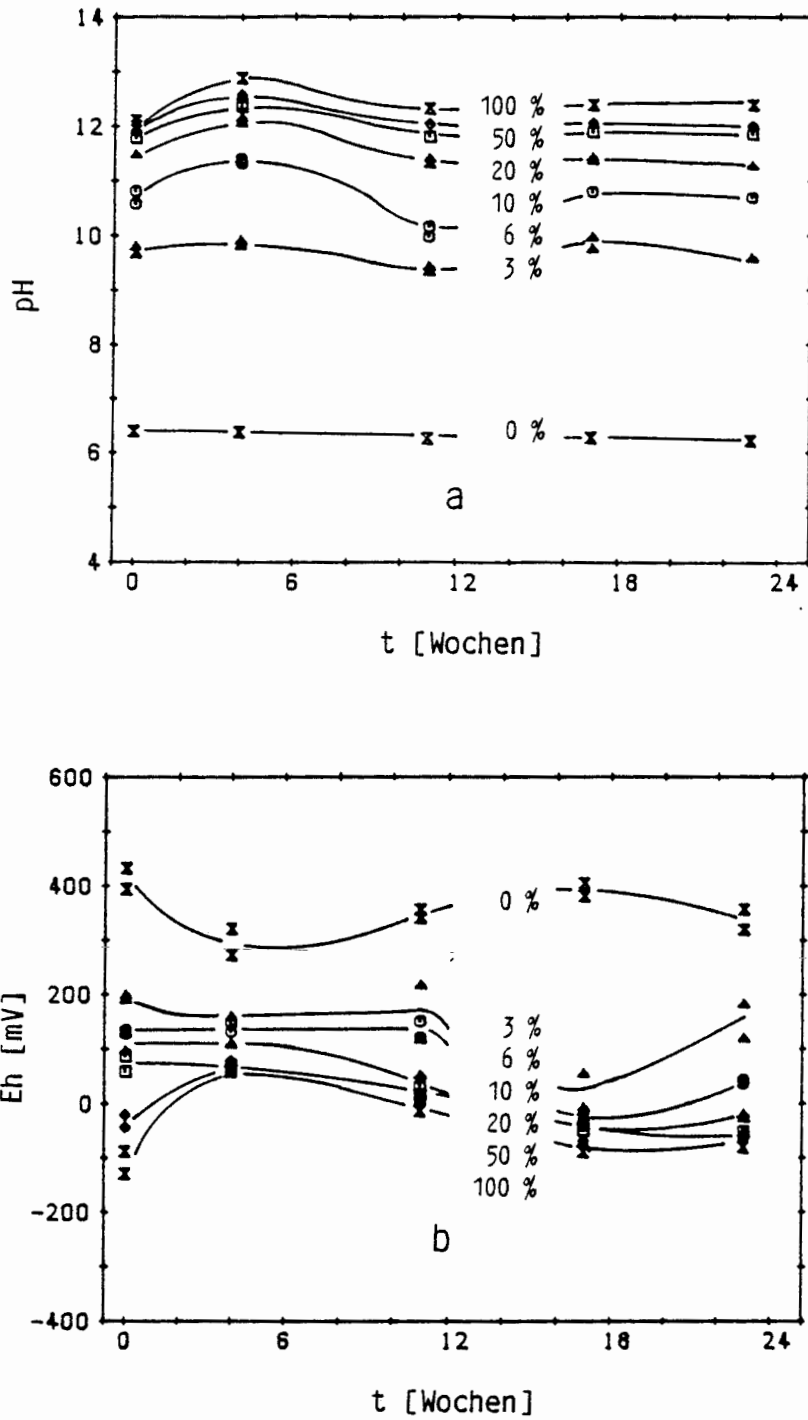


Abb. 5: Probe E 111 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte für verschiedene Probenzusammensetzungen
in Abhängigkeit von der Zeit (Angaben der Probenzusammensetzung
in % Zement)

a) pH-Werte

b) Eh-Werte

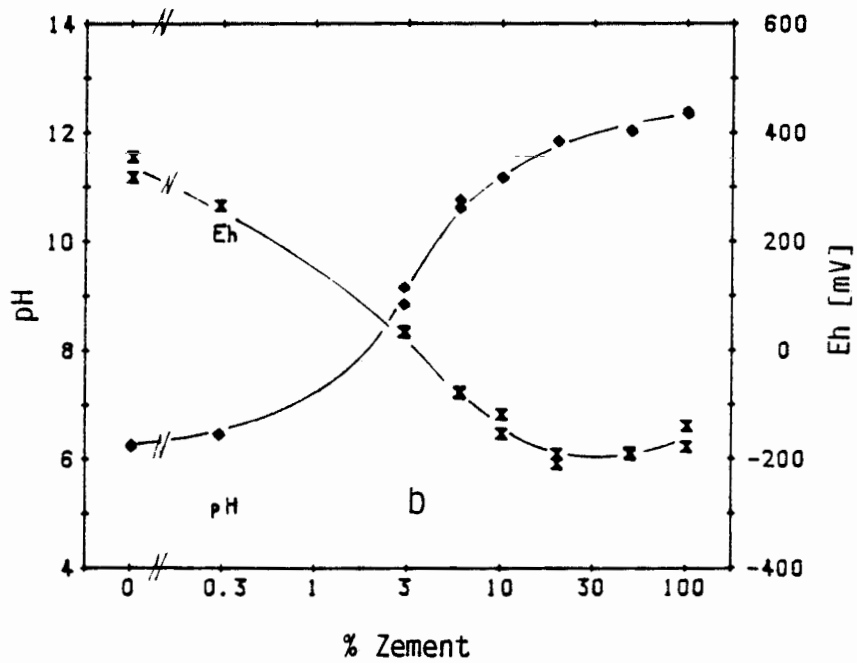
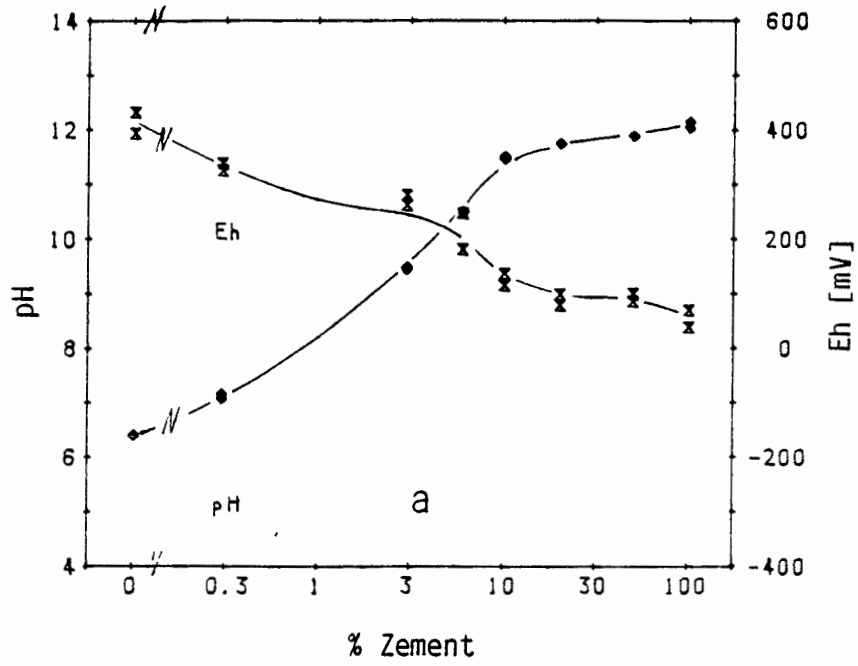


Abb. 6: Probe E 114 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte für verschiedene Probenzusammensetzungen

a) nach dem Ansatz

b) nach 23 Wochen

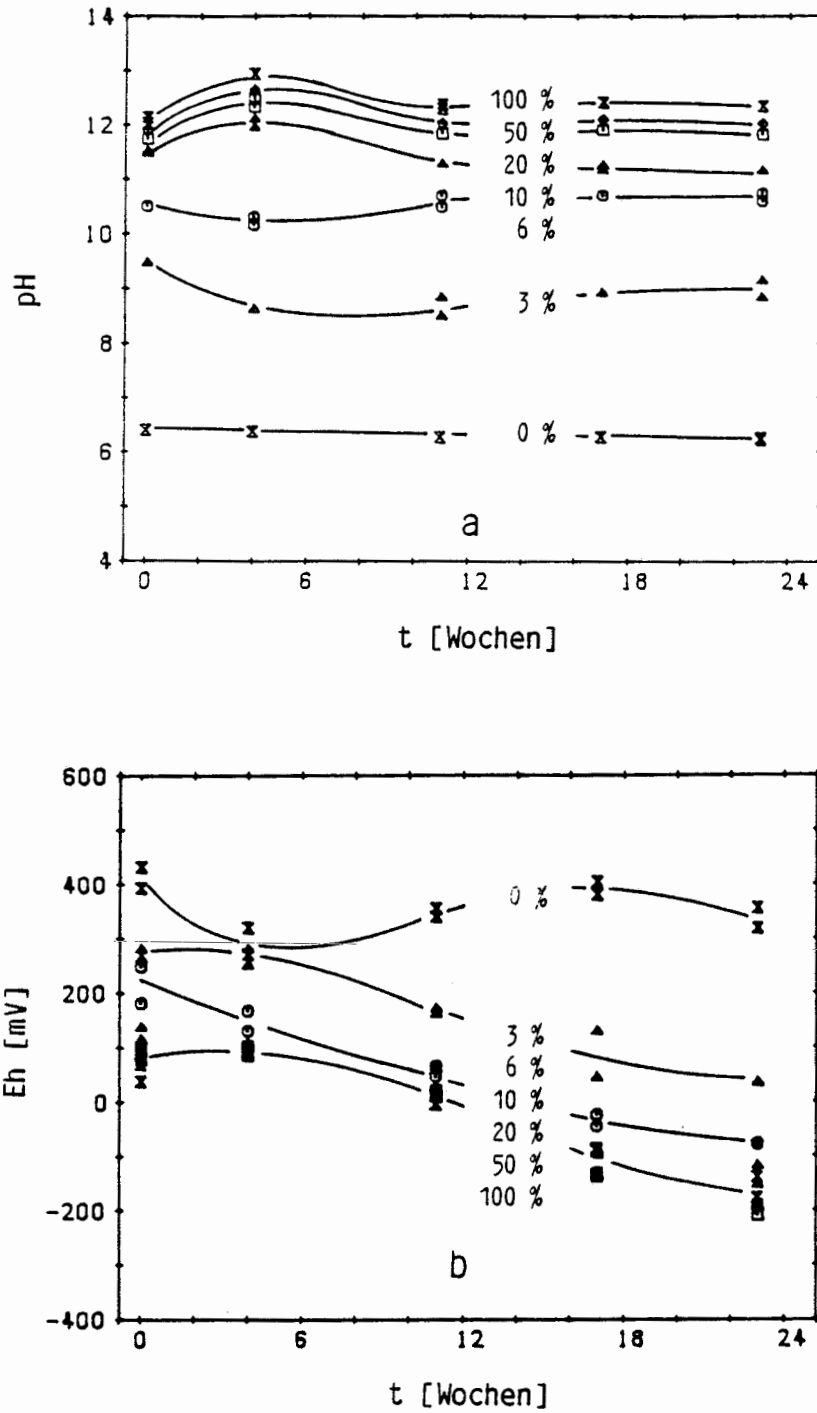


Abb. 7: Probe E 114 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte für verschiedene Probenzusammensetzungen
in Abhängigkeit von der Zeit (Angaben der Probenzusammensetzung
in % Zement)

a) pH-Werte

b) Eh-Werte

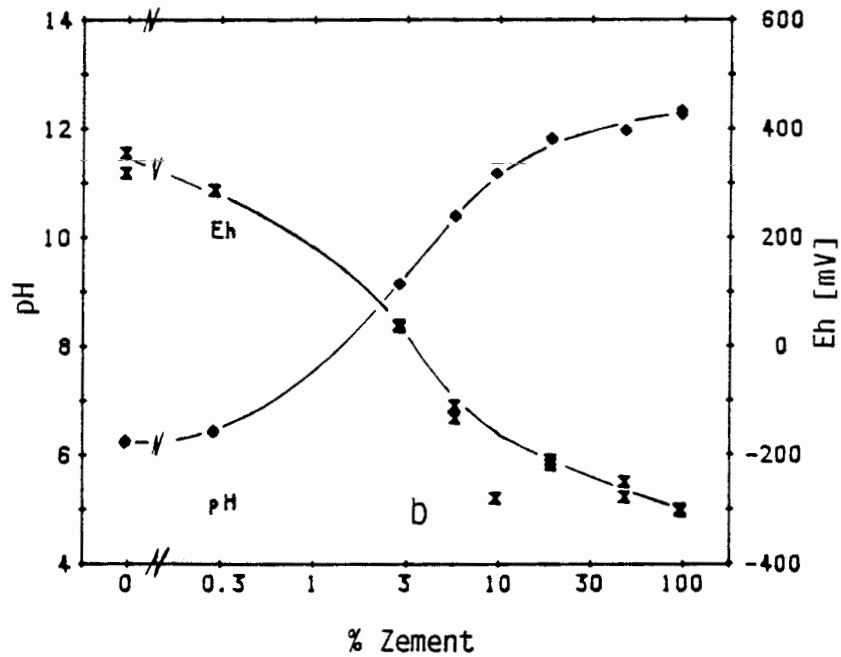
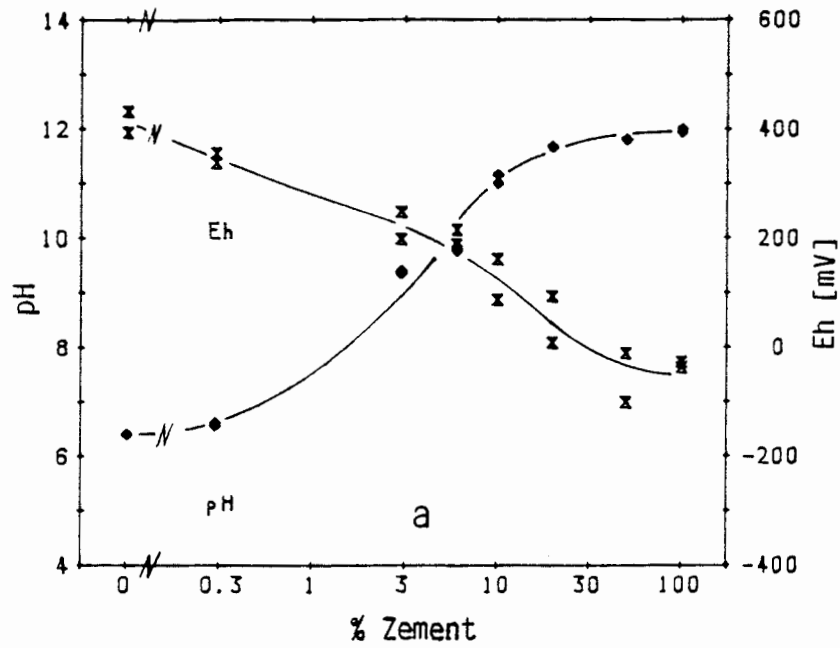


Abb. 8: Probe E 21 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte für verschiedene Probenzusammensetzungen

a) nach dem Ansatz

b) nach 23 Wochen

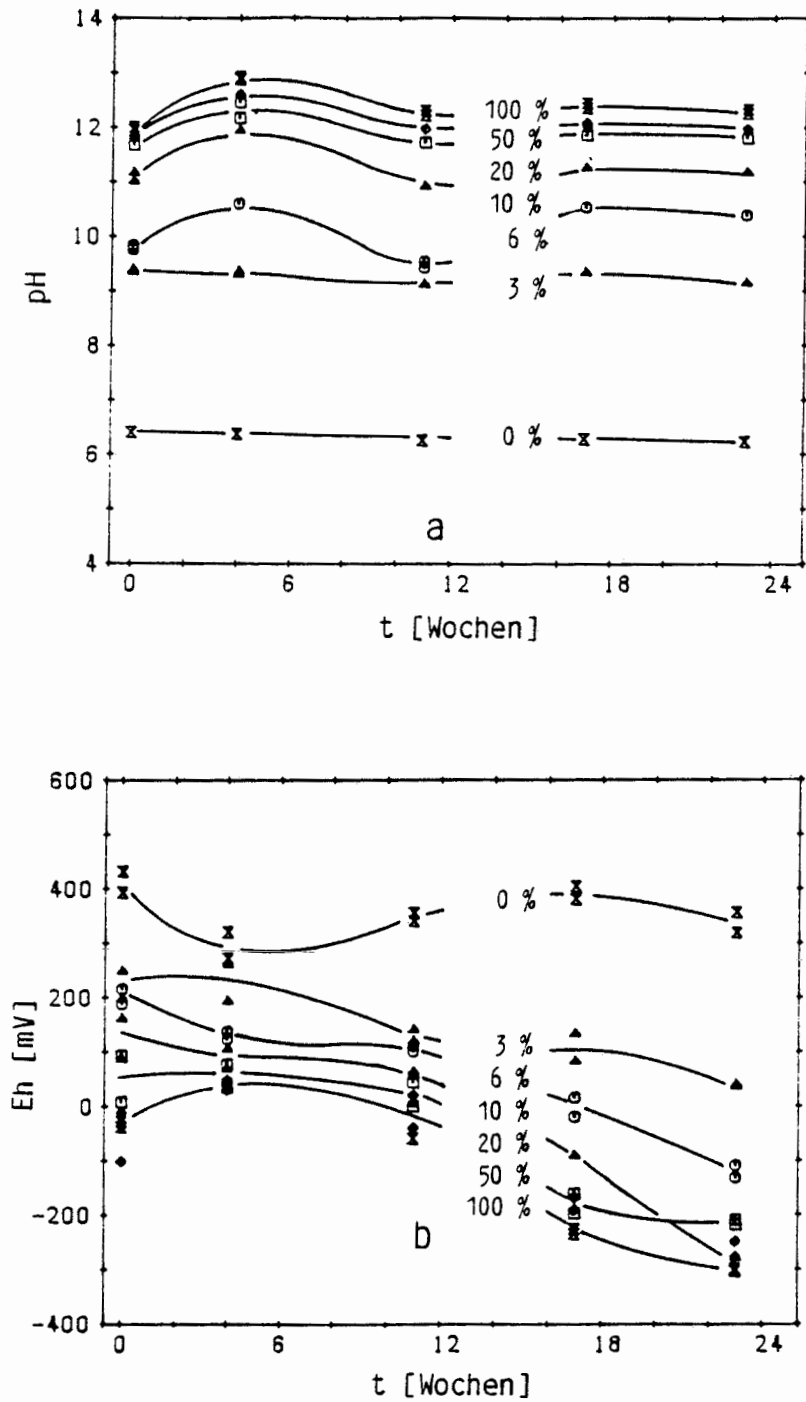


Abb. 9: Probe E 21 / Versatzmaterial / Ort-300-Wasser

Eh-, pH-Werte für verschiedene Probenzusammensetzungen
in Abhängigkeit von der Zeit (Angaben der Probenzusammensetzung
in % Zement)

- a) pH-Werte
- b) Eh-Werte

Tabelle 1: Chemische Analyse der verwendeten Zemente in Gew.-% (Angaben der INE-KfK)

Zement	HOZ 35 L-NW-HS	PZ 35 F/PZ 45 F
Glühverlust	-	0.90
SiO ₂	28.05	18.04
Al ₂ O ₃	11.89	5.18
CaO	48.03	61.25
Fe ₂ O ₃	1.30	2.78
MgO	3.70	1.83
K ₂ O	0.84	1.25
Na ₂ O	0.37	0.08
Mn ₂ O ₃	0.43	0.05
TiO ₂	0.48	0.23
SO ₃	1.54	2.47
CO ₂	0.79	3.69
Cl	0.012	0.013
H ₂ O (bis 110°C)	0.46	0.79
Rest	2.11	1.45

Tabelle 2: Zusammensetzung der zementierten Proben (Angaben der Fa. Nukem)

Probenbezeichnung (Herstellungsdatum)	Abfallart (Simulate, inaktiv)	Bindemittel	Wasser/ Zement	Dichte (g/cm ³)	Abfallgehalt (Trockensubstanz)	Druckfestigkeit (N/mm ²)
EZWOK 4 (30.03.82)	Verdampferkonzentrat (NaNO ₃)	HOZ 35 L-NW/HS 5 % Bentonit i.E.	0.35	2.0	10 % T.S.i.E.	48
E 111 (17.11.81)	Verdampferkonzentrat SWR (Na ₂ SO ₄)	PZ 45 F/HS	0.38	2.0	6.3 % T.S.i.E.	37
E 114 (18.11.81)	Verdampferkonzentrat DWR (Borsäure)	KW 3	0.54	1.8	6.3 % T.S.i.E.	17
E 21*	NaNO ₃	PZ 45 F	0.50	-	8.4 %	-

* zementierte Probe und Angaben von der INE-KfK

**Tabelle 3: Zusammensetzung von WA-Verdampferkonzentrat
(Bestandteil der Probe EZWOK 4; Angaben der Fa. Nukem)**

HNO ₃	42.5 ml
Al(NO ₃) ₃	3.0 g
Cr(NO ₃) ₃	0.6 g
Cu(NO ₃) ₂	0.6 g
Fe(NO ₃) ₃	2.8 g
KNO ₃	0.2 g
Mn(NO ₃) ₂	0.4 g
NaMoO ₄	1.0 g
Ni(NO ₃) ₂	0.4 g
Zn(NO ₃) ₂	0.6 g
Zr(NO ₃) ₄	0.4 g
Ca(NO ₃) ₂	8.8 g
Mg(NO ₃) ₂	7.9 g
NaNO ₃	249.0 g
Dibutylphosphat	0.2 g
Tributylphosphat	0.2 g
Kerosin Shell SOL T	0.02 g
NaOH	23.3 g

mit Wasser aufgefüllt auf 1 l

Dichte = 1.2 g/cm³

**Tabelle 4: Zusammensetzung von SWR-Verdampferkonzentrat
(Bestandteil der Probe E 111; Angaben der Fa. Nukem)**

NaCl	50 g
Na ₂ SO ₄ x 10H ₂ O	72 g
Na ₃ PO ₄ x 12H ₂ O	46 g
FeSO ₄ x 7H ₂ O	80 g
CaSO ₄	3 g
Kieselgur Hyflo	10 g
Al ₂ O ₃	4 g
KOH	40 g
Oxalsäure	20 g
Zitronensäure	20 g
mit Wasser aufgefüllt auf 1 l	
Dichte = 1.13 g/cm ³	

**Tabelle 5: Zusammensetzung von DWR-Verdampferkonzentrat
(Bestandteil der Probe E 114; Angaben der Fa. Nukem)**

Na ₂ B ₄ O ₇ x 10H ₂ O	80 g
H ₃ BO ₃	63 g
FeSO ₄ x 7H ₂ O	10 g
Na ₃ PO ₄ x 12H ₂ O	18 g
Na ₂ SO ₄	55 g
Kieselgur Hyflo	18 g
mit Wasser aufgefüllt auf 1 l	
Dichte = 1.09 g/cm ³	

Tabelle 6: Physikalische Größe der Konradwässer sowie Makro- und Spurenelementkonzentrationen in diesen Wässern mittels ICP- und HPIC-Analyse

	Wasser			
	Str.670		Ort 300	
pH	4.75		5.79	
Eh [mv]	311		230	
Dichte [g/cm ³]	1.142		1.128	
spez. Leitf. [µS/cm]	175000		169000	
	ICP	HPIC	ICP	HPIC
	[mg/l]		[mg/l]	
Li ⁺	-	4.34	-	2.35
NH ₄ ⁺	-	44.2	-	51.2
Na ⁺	-	59000	-	48800
K ⁺	-	217	-	213
Mg ²⁺	2360	-	1930	-
Ca ²⁺	12100	-	9110	-
Sr ²⁺	358	-	486	-
Ba ²⁺	0.08	-	0.36	-
Si ⁴⁺	2.6	-	1.6	-
Mn ²⁺	1.0	-	0.61	-
Fe ^{2+/3+}	13.8	-	16.3	-
F ⁻	-	353	-	331
Cl ⁻	-	198000	-	125000
Br ⁻	-	1270	-	746
SO ₄ ²⁻	-	1340	-	522

ICP: Kontron ASS 80

HPIC: Dionex Ionen Chromatographie System 2010i

Tabelle 7: pH- und Eh-Messung von "Zement + Versatzmaterial Konrad + Strecke-670-Wasser" (Orientierungsversuch)
V/m-Verhältnis = 1/1; Ar (CO₂: 1 %); Zement: Schwenk Portland PZ 35 F

Verhältnis (%) Zement:Versatzmat.	Ausgangswerte		3 Tage		8 Tage		11/12 Tage		4 Wochen		8/9 Wochen	
	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]
0 : 100	6.21	305	-	-	6.07	358	6.11	324	6.09	336	6.18	362
5 : 95	-	-	9.28	210	-	-	-	-	9.69	140	8.20	214
10 : 90	-	-	9.85	153	-	-	-	-	11.05	80	9.19	137
25 : 75	9.41	173	-	-	11.17	48	11.83	33	11.37	73	11.40	106
50 : 50	9.60	168	-	-	11.55	60	11.95	49	11.85	51	11.90	81
75 : 25	11.28	157	-	-	11.63	59	12.08	70	11.96	36	12.15	65
100 : 0	11.19	237	-	-	11.22	78	12.11	68	11.99	27	12.22	48

Tabelle 8: pH- und Eh-Messung von "Zementprodukt + Versatzmaterial Konrad + Ort-300-Wasser"; V/m-Verhältnis = 1/1, Ar (CO₂: 1 %); Zementprodukt: EZWOK 4

Verhältnis (%) Zement:Ver- satzmaterial	Ausgangswerte		4 Wochen		11 Wochen		17 Wochen		23 Wochen	
	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]
0 : 100	6.39±0.01	413±20	6.38±0.01	296±24	6.27±0.01	348±8	6.28±0.01	392±12	6.24±0.02	337±19
0.3 : 99.7	6.96±0.03	371±26	6.02±0.07	393±8	6.59±0.06	413±14	6.49±0.01	320±5	6.37±0.01	328±3
3 : 97	8.68±0.04	299±28	7.97±0.01	340±52	7.96±0.03	225±20	8.22±0.01	300±30	8.00±0.01	165±30
6 : 94	8.95±0.18	240±43	9.65±0.04	208±15	9.12±0.47	178±15	9.90±0.03	164±4	9.73±0.01	2±34
10 : 90	9.29±0.03	195±17	10.29±0.10	175±7	10.03±0.08	115±25	10.52±0.03	13±23	10.43±0.02	-115±26
20 : 80	9.90±0.01	181±13	11.02±0.04	146±14	10.72±0.06	-169±2	10.76±0.07	-179±20	10.65±0.02	-214±7
50 : 50	11.21±0.05	-12±10	11.63±0.06	-228±16	11.32±0.01	-307±1	11.38±0.02	-301±9	11.29±0.02	-311±30
100 : 0	11.75±0.02	-140±13	12.56±0.10	-356±10	11.96±0.03	-367±40	12.07±0.03	-373±40	11.98±0.03	-370±40

Tabelle 9: pH- und Eh-Messung von "Zementprodukt + Versatzmaterial Konrad + Ort-300-Wasser"; V/m-Verhältnis = 1/1, Ar (CO₂: 1 %); Zementprodukt: E 111

Verhältnis (%) Zement:Ver- satzmaterial	Ausgangswerte		4 Wochen		11 Wochen		17 Wochen		23 Wochen	
	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]
0 : 100	6.39±0.01	413±20	6.38±0.01	296±24	6.27±0.01	348±8	6.28±0.01	392±12	6.24±0.02	337±19
0.3 : 99.7	7.17±0.01	306±4	6.97±0.07	342±7	6.74±0.03	391±12	6.55±0.06	271±8	6.42±0.02	358±7
3 : 97	9.72±0.08	193±5	9.86±0.05	158±1	9.37±0.05	165±50	9.86±0.10	21±31	9.57±0.01	149±32
6 : 94	10.69±0.12	131±3	11.36±0.04	138±7	10.08±0.10	135±15	10.80±0.01	-27±9	10.71±0.01	39±3
10 : 90	11.47±0.01	111±16	12.10±0.05	108±2	11.34±0.06	30±20	11.39±0.03	-29±4	11.27±0.01	-26±4
20 : 80	11.79±0.01	72±14	12.39±0.02	66±4	11.80±0.01	23±8	11.90±0.01	-46±5	11.85±0.01	-54±1
50 : 50	11.91±0.01	34±12	12.58±0.01	72±5	12.03±0.01	-1±1	12.06±0.01	-75±4	12.01±0.01	-64±4
100 : 0	12.06±0.06	-110±21	12.88±0.01	59±1	12.32±0.03	-15±20	12.39±0.03	-90±20	12.39±0.03	-82±20

Tabelle 10: pH- und Eh-Messung von "Zementprodukt + Versatzmaterial Konrad + Ort-300-Wasser"; V/m-Verhältnis = 1/1, Ar (CO₂: 1 %); Zementprodukt: E 114

Verhältnis (%) Zement:Ver- satzmaterial	Ausgangswerte		4 Wochen		11 Wochen		17 Wochen		23 Wochen	
	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]
0 : 100	6.39±0.01	413±20	6.38±0.01	296±24	6.27±0.01	348±8	6.28±0.01	392±12	6.24±0.02	337±19
03 : 99.7	7.11±0.04	332±7	6.66±0.10	322±17	6.60±0.03	390±13	6.46±0.01	252±14	6.36±0.01	317±3
3 : 97	9.46±0.02	271±9	8.62±0.02	265±15	8.66±0.17	165±5	8.93±0.01	86±43	8.99±0.95	33±1
6 : 94	10.51±0.01	221±40	10.24±0.07	149±19	10.61±0.11	56±10	10.72±0.01	-36±11	10.69±0.08	-79±1
10 : 90	11.50±0.03	125±11	12.03±0.09	97±9	11.28±0.01	41±20	11.22±0.05	-95±5	11.17±0.01	-137±18
20 : 80	11.74±0.01	88±10	12.42±0.08	94±9	11.86±0.01	15±5	11.91±0.01	-136±3	11.83±0.01	-201±9
50 : 50	11.90±0.01	92±7	12.64±0.02	99±4	12.03±0.01	13±3	12.10±0.01	-134±4	12.03±0.01	-192±2
100 : 0	12.09±0.05	54±16	12.95±0.01	95±6	12.34±0.04	9±8	12.43±0.02	-89±2	12.36±0.04	-160±20

Tabelle 11: pH- und Eh-Messung von "Zementprodukt + Versatzmaterial Konrad + Ort-300-Wasser"; V/m-Verhältnis = 1/1, Ar (CO₂: 1 %); Zementprodukt: E 21

Verhältnis (%) Zement:Ver- satzmaterial	Ausgangswerte		4 Wochen		11 Wochen		17 Wochen		23 Wochen	
	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]	pH	Eh[mV]
0 : 100	6.39±0.01	413±20	6.38±0.01	296±24	6.27±0.01	348±8	6.28±0.01	392±12	6.24±0.02	337±19
0.3 : 99.7	6.60±0.03	347±9	6.45±0.07	334±6	6.51±0.01	313±14	6.43±0.02	287±1	6.33±0.01	323±12
3 : 97	9.38±0.02	223±25	9.34±0.03	227±34	9.12±0.02	130±10	9.33±0.01	107±25	9.15±0.01	37±2
6 : 94	9.81±0.04	202±14	10.60±0.02	130±7	9.48±0.05	106±6	10.53±0.01	-3±18	10.39±0.01	-122±12
10 : 90	11.09±0.08	124±38	11.94±0.02	87±19	10.92±0.03	59±4	11.26±0.03	-92±20	11.18±0.03	-280±30
20 : 80	11.68±0.01	51±43	12.32±0.14	56±21	11.72±0.01	22±22	11.86±0.01	-180±18	11.81±0.01	-215±5
50 : 50	11.80±0.01	-57±45	12.60±0.02	39±9	11.98±0.01	-10±30	12.05±0.03	-181±11	11.96±0.01	-264±14
100 : 0	11.98±0.04	-33±5	12.91±0.02	39±3	12.26±0.05	-25±35	12.40±0.04	-232±5	12.29±0.04	-302±2