



Bundesamt für Strahlenschutz

# Deckblatt

GZ: QM - 9A 34216000 / SE 4.2.3

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	34216000	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016

Titel der Unterlage:

BEWERTUNG GEPLANTEN VERSATZINJEKTION VON NATRONWASSERGLAS IN DEN SALZVERSATZ IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II

Ersteller:

GRS, AF-CONSULT SWITZERLAND AG

Stempelfeld:

bergerechtlich verantwortliche Person:

atomrechtlich verantwortliche Person:

Projektleitung:

Freigabe zur Anwendung:

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 des Bfs.



Bundesamt für Strahlenschutz

# Revisionsblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: II
NAAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	34216000	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016

Titel der Unterlage:

BEWERTUNG GEPLANTEN VERSATZINJEKTION VON NATRONWASSERGLAS IN DEN SALZVERSATZ IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer	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



Bundesamt für Strahlenschutz

**Bewertung der geplanten Versatzinjektion von  
Natronwasserglas in den Salzversatz in der  
Schachanlage Asse II**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 1 von 39
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		Stand: 30.01.2016

## **Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natron- wasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II**

**Auftragnehmer**

**AF-Consult Switzerland AG**

**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH,  
Braunschweig**

**AF 1764/33**

**GRS 550800-35**

Baden, 30. Januar 2016

Braunschweig, 30. Januar 2016



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 2 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		Stand: 30.01.2016

### Impressum:

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz  
Willy-Brandt-Str. 5  
D-38226 Salzgitter  
Telefon: +49 (0)30 18333 0  
Telefax: +49 (0)30 18333 1885  
E-Mail: [epost@bfs.de](mailto:epost@bfs.de)  
Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

### Ersteller:

AF-Consult Switzerland AG  
Täferstrasse 26  
CH-5405 Baden  
Telefon: +41 (0)56 483  
Telefax: +41 (0)56 483  
E-Mail: [info.ch@afconsult.com](mailto:info.ch@afconsult.com)  
Internet: [www.afconsult.com](http://www.afconsult.com)

Gesellschaft für Anlagen- und  
Reaktorsicherheit (GRS)  
gGmbH  
Theodor-Heuss-Straße 4  
38122 Braunschweig  
Telefon: +49 531 8012  
Telefax: +49 531 8012  
E-Mail: \_\_\_\_\_  
Internet: [www.grs.de](http://www.grs.de)

[N:\projekte\asse-8-bfs\notizen\grs-550800-35\_BE1764\_33\_Wasserglas\_R4\_final.docx]

Der Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachtanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 3 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016

### Revisionsblatt

Rev.	Rev.-Stand Datum	revidierte Seite	Kat.*)	Erläuterung der Revision

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





Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachtanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 5 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 30.01.2016
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		

migrationsfähig bliebe und in größeren Mengen in eine ELK gelangen würde, wäre dies ungünstig für das chemische Milieu.

Ob bei den mehrstufigen Poreninjektionen der gesamte Versatzkörper von den Injektionsmitteln mit vertretbarem technischem Aufwand erreicht werden kann, ist bisher nicht belegt. Die bisher vorliegenden Erkenntnisse zum Eindringvermögen und zur Eindringtiefe von Injektionsmitteln in Salzversatz lassen einen hohen technischen Aufwand und eine Vielzahl von Injektionsbohrungen für ein weitgehendes Erreichen des Porenraums erwarten. Es ist deshalb fraglich, ob der Nutzen für die Langzeitsicherheit den sehr hohen technischen Aufwand rechtfertigt und ob die positiven Effekte einer Poreninjektion durch negative überdeckt werden. Der Technikumsversuch kann für die Beantwortung dieser Fragen und für die Einstellung eines geeigneten technischen Verfahrens Erkenntnisse bringen. Vor dem Technikumsversuch soll vom Antragsteller klar aufgezeigt werden, welche noch offenen Fragen zum chemischen Prozessablauf und zum technischen Verfahren beantwortet werden und ob die Versuchsbedingungen repräsentativ für die Versatzkörper in der Schachtanlage sind.



Bundesamt für Strahlenschutz

# Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 6 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016

## INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG .....	4
INHALTSVERZEICHNIS .....	6
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	7
TABELLENVERZEICHNIS .....	7
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>8</b>
<b>2 FUNKTIONALITÄT VON NATRONWASSERGLASSYSTEMEN .....</b>	<b>10</b>
2.1 GRUNDLEGENDE EIGENSCHAFTEN UND VERHALTEN VON NATRON-WASSERGLAS .....	10
2.2 ERFAHRUNGEN ZUR ANWENDUNG VON NATRON-WASSERGLAS IM BERGBAU .....	14
<b>3 RANDBEDINGUNGEN DES TECHNIKUMSVERSUCHS IM ABBAU 1/775 UND DATENGRUNDLAGE .....</b>	<b>16</b>
<b>4 CHEMISCH-MINERALOGISCHE ASPEKTE .....</b>	<b>21</b>
4.1 VOLUMENBILANZEN .....	21
4.2 CHEMISCH-MINERALOGISCHE ASPEKTE WÄHREND DES GEGENFLUTENS .....	25
<b>5 AUSWIRKUNGEN AUF DIE LANGZEITSICHERHEIT .....</b>	<b>27</b>
5.1 GEBIRGSMECHANISCHE VERHÄLTNISSE .....	28
5.1.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775 .....	28
5.1.2 Allgemeine Aussagen zu den Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit .....	28
5.2 HYDRAULISCHE VERHÄLTNISSE .....	29
5.2.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775 .....	29
5.2.2 Allgemeine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit .....	29
5.3 EINFLUSS AUF TRANSPORTPROZESSE .....	30
5.3.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775 .....	30
5.3.2 Allgemeine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit .....	30
5.4 MILIEU .....	31
5.4.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775 .....	31
5.4.2 Allgemeine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit .....	32
5.5 RADIONUKLIDTRANSPORT .....	32
5.6 LANGZEITSTABILITÄT .....	33
<b>6 ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG .....</b>	<b>34</b>
<b>7 LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>37</b>

Gesamtseitenzahl: 39

Stichworte: Natronwasserglas, Versatzinjektion, Technikumsversuch, Geochemie, Langzeitsicherheit

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>			<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachtanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 7 von 39  Stand: 30.01.2016
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Relative Anteile unterschiedlicher Silikatspezies in Abhängigkeit vom SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O-Verhältnis (links) und Beispiel für unterschiedliche Strukturen von Silikatspezies (rechts) [PQC 2001].....	12
Abb. 2:	Versuchsbereich und Anordnung des Bohrfächers für die Versatzinjektionen im Abbau 1/775, nach [Asse 2012a] .....	18
Abb. 3:	Volumenverhältnis der Porenfüllungen bei der Umwandlung von NWG 50/52 über Silikagel zum Quarz, idealisiert bei Anwesenheit von ausschließlich Halit. ....	23

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Zusammensetzung, Dichte und Viskosität von Standard-Wassergläsern der Firma PQ Cooperation, kopiert aus [PQC 2007]. ....	10
Tab. 2:	Kennwerte für die Zusammensetzung von Standard-NWG aus [DBE 2012]. ....	11
Tab. 3:	Versatzvolumina und Porenräume im Versuchsbereich des Abbaus 1/775.....	17
Tab. 4:	Prozentuale Aufteilung der Porenfüllung im Versatzkörper des Versuchsbereiches nach der Versatzinjektion (Schätzwerte) .....	19
Tab. 5:	Stoffmengen NWG im Versuchsbereich von Abbau 1/775 (Schätzwerte) .....	19
Tab. 6:	Stoffmengen und deren Änderungen für NWG 50/52 im Versuchsbereich .....	24

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachtanlage Asse II</b>					
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 8 von 39			
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN				
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016			

## 1 EINLEITUNG

In der Schachtanlage Asse wurde Salzversatz (Eigenversatz und Fremdversatz aus der Schachtanlage Ronnenberg) zur Verfüllung von Grubenbauen genutzt. Der Eigenversatz besteht aus Salzgrus, welcher beim Auffahren, Nachschnitt und Berauben von Grubenbauen anfiel. Bei ausgewählten Versatzkörpern im Nahbereich der Einlagerungskammern (ELK) soll der Porenraum mittels Injektionen reduziert werden. Dadurch soll im Fall eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts (AÜL) die Stützwirkung des Versatzes erhöht und das Lösungsvolumen im Porenraum verringert werden. Injektionsmaßnahmen in den ELK werden ausgeschlossen.

Die mehrstufige Injektion eines Versatzkörpers in der Schachtanlage Asse II unter Verwendung von Brucit-Suspensionen und Natronwasserglas (NWG) soll erstmals im Rahmen des Sonderbetriebsplans 24/2008 [Asse 2009] in einem großtechnischen Technikumsversuch durchgeführt werden, um die technische Machbarkeit unter in-situ-Bedingungen zu belegen und Versatzparameter nach einer Versatzinjektion zu bestimmen.

Anhand des Technikumsversuchs sollen generelle Auswirkungen der mehrstufigen Injektionen auf Aspekte der Langzeitsicherheit diskutiert werden. Auswirkungen brucithaltiger Baustoffen (Mg-Depot) auf Aspekte der Langzeitsicherheit sind ausführlich diskutiert, siehe u.a. [AG 2012]. Für die Beurteilung des Einflusses der Injektion mit NWG auf Aspekte der Langzeitsicherheit müssten ähnliche Themen diskutiert werden wie z.B. für die Eignungsbewertung potentieller Materialien für die Mg-Depots in den ELK: die Langzeitwirksamkeit, der Einfluss auf hydraulische und mechanische Eigenschaften des Systems sowie auf das chemische Milieu. Da die Einbauorte für NWG und die technischen Verfahren zum Einbau des NWG nicht festgelegt sind, werden in der Stellungnahme ausschließlich generelle Aussagen zu möglichen Einflüssen der Versatzinjektion mit Brucit-Mörtel und NWG getroffen. Gesicherte Aussagen zu

- gebirgsmechanischen Systemeigenschaften, wie Kompaktierbarkeit und Stützwirkung des Versatzes,
- hydraulischen Verhältnissen,
- volumetrischen Systemeigenschaften, insbesondere bei Umwandlungsprozessen,
- geochemischen Milieubedingungen außerhalb der Einlagerungsbereiche, wie z.B. Wechselwirkungen mit anstehendem Salzgestein, Salzversatz und Brucit-Mörtel,
- Radionuklidrückhaltung bzw. –ausbreitung,

und zu relevanten Veränderungen des langzeitigen Systemverhaltens sind erst möglich, wenn (a) die mineralogische Zusammensetzung der Versatzkörper – einschließlich Kalisalzmineralen und Lösungen – qualitativ und hinreichend quantitativ bekannt, (b) das technische Verfahren für mehrstufige Injektionen dargelegt und (c) die Geometrie der Injektionskörper festgelegt sind. Hier werden, soweit überhaupt möglich, allgemein gültige Aussagen zu Auswirkungen derartiger Versatzinjektionen auf das Langzeitverhalten des Gesamtsystems diskutiert.



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 9 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		Stand: 30.01.2016

In Kapitel 2 werden kurz die grundlegenden Eigenschaften von NWG und Erfahrung mit NWG im Bergbaubetrieb zusammengefasst. In Kapitel 3 werden Randbedingungen für die geplante Versatzinjektion brucithaltiger Suspensionen und NWG im Abbau 1/775 sowie die Materialparameter für NWG aufgelistet, welche die Basis für das nachfolgende Kapitel bilden. In Kapitel 4 werden wesentliche chemisch-mineralogische Aspekte beschrieben und eine Mengenabschätzung dargelegt. In Kapitel 5 werden generelle Einflüsse der Versatzinjektion auf o.g. Aspekte der Langzeitsicherheit diskutiert. Kapitel 6 schließt die Stellungnahme mit einer Zusammenfassung der zuvor diskutierten Aspekte und einer Eignungsbewertung für die geplante Versatzinjektion im Abbau 1/775 ab.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 10 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

## 2 FUNKTIONALITÄT VON NATRONWASSERGLASSYSTEMEN

### 2.1 GRUNDLEGENDE EIGENSCHAFTEN UND VERHALTEN VON NATRON-WASSERGLAS

Nachfolgend werden wesentliche Eigenschaften und Reaktionen von Wasserglas sowie seinen Lösungen beschrieben. Eine umfassende Zusammenfassung zu diesem Thema, ebenfalls vor dem Hintergrund der Verwendung in Salzbergwerken, gibt [DBE 2008b].

Die Eigenschaften von Natronwasserglaslösungen (pH-Wert, Viskosität, Dichte) variieren in Abhängigkeit der Zusammensetzung im System  $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ . Tab. 1 gibt die Zusammensetzung, Dichte und Viskosität einiger Standard-Wasserglasprodukte der Firma PQ Cooperation wieder. Anhand dieser Beispiele ist zu erkennen, dass Dichte und Viskosität bei gleichem  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis zusätzlich vom Wassergehalt abhängen. Die Viskosität steigt dabei mit dem Feststoffanteil oder bei gleichem Feststoffanteil mit dem  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis. Der pH-Wert von NWG-Systemen ist stark alkalisch im pH-Bereich 11 bis 13. In Tab. 2 sind die in [DBE 2012] betrachteten Standard-NWG zusammengestellt.

**Tab. 1:** Zusammensetzung, Dichte und Viskosität von Standard-Wassergläsern der Firma PQ Cooperation, kopiert aus [PQC 2007].

PQ Product Name	Wt Ratio $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ $\pm 0.05$	Wt % $\text{Na}_2\text{O}$ $\pm 0.2$	Wt % $\text{SiO}_2$ $\pm 1.0$	Density			Viscosity cps
				$^{\circ}\text{Be}'$ $\pm 0.5$	lb/gal	$\text{g}/\text{cm}^3$	
N®, N®Clear	3.22	8.9	28.7	41.0	11.6	1.38	180
N®38	3.22	8.2	26.4	38.0	11.3	1.36	60
STIXSO®RR	3.25	9.2	30.0	42.7	11.8	1.41	830
E®	3.22	8.6	27.7	40.0	11.5	1.38	100
O®	3.22	9.1	29.5	42.2	11.8	1.41	400
K®	2.88	11.0	31.7	47.0	12.3	1.48	960
M®	2.58	12.4	32.1	49.3	12.6	1.52	780
STAR®	2.50	10.6	26.5	42.0	11.7	1.41	60
RU®	2.40	13.8	33.2	52.0	13.0	1.56	2,100
D®	2.00	14.7	29.4	50.5	12.8	1.53	400
BJ 120™	1.80	13.1	23.7	43.8	11.9	1.42	655
BW®50	1.60	16.4	26.2	50.3	12.8	1.53	280

in Bezug auf die Einheit der Viskosität gilt  $1 \text{ cps} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 11 von 39 Stand: 30.01.2016	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		

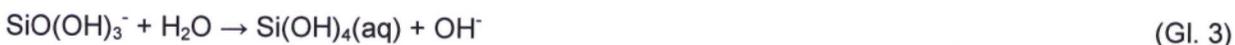
**Tab. 2:** Kennwerte für die Zusammensetzung von Standard-NWG aus [DBE 2012].

	Feststoff- gehalt [%]	Na <sub>2</sub> O [Ma%]	SiO <sub>2</sub> [Ma%]	Gewichts- verhältnis SiO <sub>2</sub> :Na <sub>2</sub> O	Molverhältnis SiO <sub>2</sub> :Na <sub>2</sub> O	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
NWG 37/40	35,5	8,2	27,3	3,33	3,64	1,34 – 1,38
NWG 40/42	39,1	9,1	30,0	3,30	3,60	1,38 – 1,41
NWG 48/50	44,8	12,4	32,4	2,61	2,86	1,49 – 1,53
NWG 50/52	48,1	14,1	34,0	2,41	2,63	1,55 – 1,56
NWG 58/60	55,0	18,0	37,0	2,06	2,25	1,67 – 1,71

Das Molverhältnis SiO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>O ist bei allen Rezepturen > 2, d.h. auf 1 mol Si kommt weniger als 1 mol Na. Formal ist die Kieselsäure also nicht vollständig bis zur ersten Stufe dissoziiert. Die Auflösung von NWG in Wasser kann somit vereinfacht durch folgende Reaktion beschrieben werden:



In Abhängigkeit vom pH-Wert und der Silikat-Konzentration kann diese weiter dissoziieren oder aber in Orthokieselsäure übergehen



Dabei liegen die verschiedenen Dissoziationsstufen nebeneinander im Gleichgewicht vor.

Polymerisierung unter Wasserabspaltung führt zu löslichen, polymeren Verbindungen wie Di-, Tri- und höheren Kieselsäuren bis zu kolloidalen Partikeln. Bei fortschreitender Polymerisierung können sich daraus Ketten und Netzwerke bilden, die schließlich das ganze wässrige Medium durchziehen und sich zu einem „Gel“ verfestigen [ILE 1979].

Wasserglaslösungen mit niedrigen und mittleren SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O-Verhältnissen haben neben monomeren Silikat-Spezies deutliche Gehalte an niedermolekularen Ketten und Ringen. Bei höheren SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O-Verhältnissen dominieren komplexe Silikat-Spezies (Abb. 1). Die Unterschiede der Silikatspeziation haben einen messbaren Einfluss auf die Rheologie des Fluids.



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 12 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	

Eine Senkung des pH-Werts unter 10,5 bewirkt eine Selbst-Polymerisation bzw. Kondensation der gelösten Silikatstrukturen, die letztlich zur Ausfällung amorph, gelartiger<sup>1</sup> Silikate führt. Auch durch Zugabe eines Elektrolyts, z.B. NaCl, zur kolloidalen Wasserglaslösung erfolgt gemäß [DBE 2011] – aufgrund einer Destabilisierung des Kolloid-Lösung-Systems durch Neutralisierung der Kolloidoberflächen – eine Agglomeration der Kolloide, die zur Bildung „gelartiger Massen“ führt. Durch Alterungs- bzw. Kristallisationsprozesse, verbunden mit Abgabe von Wasser, bilden sich aus diesen „gelartigen Massen“ sukzessive meta-stabile Silikatphasen bis hin zum langfristig stabilen Quarz.

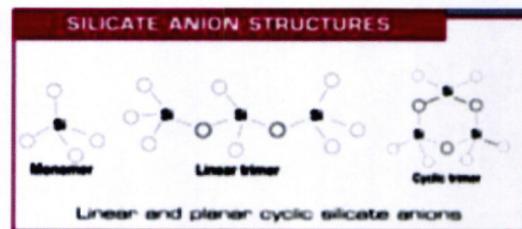
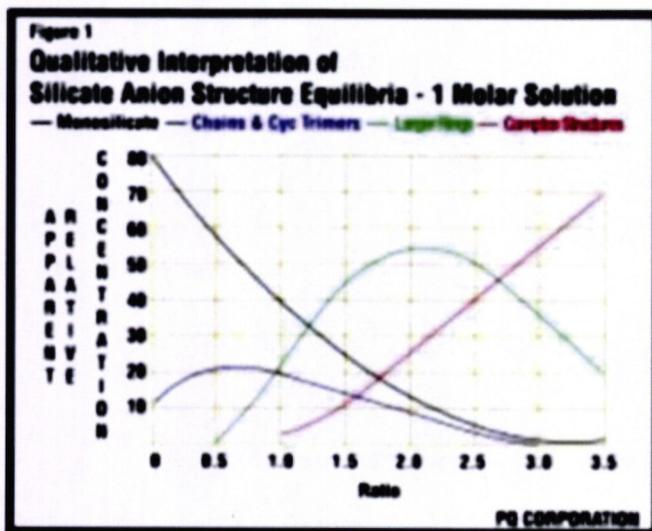


Abb. 1: Relative Anteile unterschiedlicher Silikatspezies in Abhängigkeit vom SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O-Verhältnis (links) und Beispiel für unterschiedliche Strukturen von Silikatspezies (rechts) [PQC 2001]<sup>2</sup>

Ein Beispiel für gelartige Phasen sind die sogenannten „magischen Kristallgärten“. Dort reagieren die Ionen von Metallsalzen an der Grenzfläche zwischen Salz bzw. dessen konzentrierter Lösung und Wasserglas zu schwer löslichen Silikaten. Diese bilden eine semipermeable Membran, durch welche aufgrund von Osmose Wasser strömen kann. Der Wasserdruck im Inneren der Membran steigt, die Membran dehnt sich aus und platzt von Zeit zu Zeit auf. Durch den erneuten Kontakt von Salzlösung und Wasserglas kommt es zu wiederholter bzw. fortschreitender Membranbildung. Das Joosten-Verfahren zur Bodenverfestigung basiert ebenso auf diesem Prozessverlauf. Vereinfacht kann die entscheidende Reaktion wie folgt formuliert werden:



<sup>1</sup> „Gelartig“ bedeutet hier im Wesentlichen, dass die Phasen röntgenamorph und wasserhaltig sind, im Gegensatz zu den langfristig stabilen, kristallinen und wasserfreien Phasen.

<sup>2</sup> Die Beschriftungen in den Abbildungen sind schwer zu entziffern. In der linken Abbildung ist die „Apparent relative Concentration“ als Funktion der „Ratio“ für „Monosilicate“, „Chains & Cyclic Trimers“, „Larger Rings“ und „Complex Structures“ aufgetragen, in der rechten Abbildung sind „Monomer“, „Linear Trimer“ und „Cyclic Trimer“ dargestellt

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>			<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 13 von 39 Stand: 30.01.2016
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	

In CaCl<sub>2</sub>-reichen Systemen kann der Prozessablauf – ähnlich dem Joosten-Verfahren – vereinfacht durch die Gleichung 4 beschrieben werden.

Liegt ein MgCl<sub>2</sub>-reiches System vor, das durch MgCl<sub>2</sub>-haltige Minerale oder Lösung gebildet werden kann, wird Brucit (Mg(OH)<sub>2</sub>) gefällt. Je nach den chemischen Eigenschaften des Systems, wie der pH-Wert der Lösung, können sich auch Mg-Oxychloride (3-1-8 oder 5-1-8 Sorelphasen) bilden. Die Bildung von Mg-Oxychloriden konnte auch bei der Reaktion von NWG und Bischofit nachgewiesen werden [BOR 2010]. Bei Anwesenheit von sulfat- bzw. carbonathaltigen Mineralen und Baustoffen können auch basische Oxysulfate, wie z.B. Mg(OH)<sub>2</sub>·2MgSO<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O [DBE 2011], bzw. basische Oxycarbonate oder Oxychlorocarbonate gebildet werden. Wegen der hohen Si-Gehalte ist auch die Bildung von Magnesiumsilikathydraten möglich. Entsprechende Untersuchungsergebnisse zu chemischen Reaktionen von NWG im Kontakt mit verschiedenen Salzlösungen sind in [DBE 2011] dokumentiert.

In Abwesenheit anderer Kationen können durch Kondensation schwer lösliche Natriumsilikathydrate gebildet werden und langfristig in gelöste Na-Ionen und reine Kieselgesteine (englisch: Cherts) übergehen. Letztlich sind die Reaktionen komplex und von den chemisch/mineralogischen Bedingungen abhängig. In chemisch komplexeren, natürlichen Systemen bei geringerer Basizität finden sich u.a. Belege für die Umwandlung von Natriumsilikaten – z.B. Magadiit, Kenyait oder Makatit – in Cherts, z.B. in Sedimenten alkalischer Seen [BEN 1983], [KRA 1998], [SEB 2001].

Die chemische Zusammensetzung der initialen Silikagelphase variiert in Abhängigkeit von den physikochemischen Bedingungen. Außerdem ist der Übergang von der kolloidalen Lösung zu einem Silikagel fließend. Anfänglich besitzt die Gelphase das gleiche SiO<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O-Verhältnis wie die kolloidale Lösung [ILE 1979]. Als Summenformel für die löslichkeitsbestimmende Festphase - die „monomere Si-Lösungsspezies“ – wird im Allgemeinen ein Verhältnis von SiO<sub>2</sub> zu 2H<sub>2</sub>O unterstellt [MAR 1980], das nominell der Zusammensetzung der instabilen „Orthokieselsäure“ (Si(OH)<sub>4</sub>) und einem Wassergehalt von ca. 37,5 % entspräche. Aus natürlichen Systemen sind amorphe, wasserhaltige SiO<sub>2</sub>-Phasen bekannt, die deutlich geringere Wassergehalte aufweisen. Für Opal wird ein Wassergehalt von 4 bis 9 %, maximal bis 20 %, angegeben bei einer Dichte von 2,0 bis 2,2 g/cm<sup>3</sup> [MAT 1987]. Diese Minerale können als Alterungsprodukte der Kieselsäure durch Kondensation aufgefasst werden. Das finale Umwandlungsprodukt bei der Alteration der Silikate bzw. Kieselgesteine ist α-Quarz mit einer Dichte von 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Die Existenz initialer fester Gelphasen mit dem Verhältnis SiO<sub>2</sub> zu 2H<sub>2</sub>O, wie [MAR 1980], lässt sich aus der uns vorliegenden Literatur nicht eindeutig belegen, aber die gute Übereinstimmung experimentell ermittelter Löslichkeiten des amorphen SiO<sub>2</sub> in verschiedenen Salzlösungen nach einem Tag Kontakt von NWG mit Lösung, vgl. [DBE 2011], sind ein starkes Indiz hierfür.

Die Löslichkeit von SiO<sub>2</sub>:2H<sub>2</sub>O in Salzlösungen ist sehr gering. In 6 molaler NaCl-Lösung beträgt die Gleichgewichtskonzentration von Silizium ca. 6·10<sup>-4</sup> molal, in 7 molaler MgCl<sub>2</sub>-Lösung (ähnlich R- bzw. IP21-Lösung) nur 8,5·10<sup>-5</sup> molal. Setzt die Bildung von kristallinem Quarz ein, ist die Löslichkeit nochmals geringer. In einem mit NWG injizierten Versatzkörper wäre ein deutlicher Lösungsüberschuss notwendig, um einen relevanten Anteil dieser Phasen zu lösen. Da mit NWG injizierter Salzversatz nicht oder nur sehr eingeschränkt von Lösung durchströmt wird, ist ein signifikantes Auflösen von Silika-Gel bzw. -Festphasen auszuschließen.

				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II</b>			
<b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>							
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 14 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

Semiquantitative Messungen in den Experimenten mit NWG, Halit und gesättigter NaCl-Lösung zeigen für die Festphase ein  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ -Verhältnis von 1:22 [DBE 2011]. Dieses Verhältnis ist deutlich geringer als das der natürlich vorkommenden Natriumsilikathydrate. Vermutlich handelt es sich hierbei gar nicht mehr um ein Silikat, sondern um auskristallisierte, feine Halit-Dendriten auf Na-freier Kieselsäure, die optisch nicht aufgelöst werden konnten, jedoch mit der Kieselsäure zusammen gemessen wurden. Solche Halit-Dendriten sind in [DBE 2011] belegt. Das im NWG enthaltene Natrium kann sich somit nur als NaOH in Lösung befinden, so dass der pH deutlich ansteigt. In  $\text{MgCl}_2$ -reicher Lösung und Q-Lösung lagen  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ -Verhältnisse von 1:9 bis 1:20 vor. Die geringeren Na-Gehalte sind denen natürlicher Natriumsilikathydrate, wie Magadiit ( $\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) oder Kenyait ( $\text{NaSi}_{11}\text{O}_{20,5}(\text{OH}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), sehr ähnlich und können als Hinweis für die Bildung solcher Phasen angesehen werden. Die gebildeten Phasen sind deutlich Na-ärmer als das NWG der Versuche ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ -Verhältnis 1:3,4), so dass Na in Lösung übergegangen sein muss.

Sofern nur Halit – weder Kalisalze noch andere Versatzstoffe – als Reaktionspartner zur Verfügung stünde, könnte kein Halit gefällt werden. Der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Anteil des NWG verbliebe als gelöstes NaOH, das für einen gleichbleibend hohen pH-Wert nach dem Lösungskontakt von NWG verantwortlich wäre. Im Versuch V1 [DBE 2011] wurde ein pH-Wert von 11 gemessen. In Realität kommen im Salzversatz und Salzgestein nicht nur Steinsalz bzw. Halit, sondern auch Kalisalze (Kieserit, Polyhalit, Carnallit) und Anhydrit vor, so dass zumeist neben Na-Ionen auch Mg-, K- und Ca-Ionen vorliegen. Wenn  $\text{MgCl}_2$  bzw. Mg-Ionen vorliegen, bilden sich Brucit und/oder Mg-Oxychloride bzw. Mg-Oxysulfate, vgl. die Reaktion von NWG mit Bischofit bzw. mit Q-Lösung [DBE 2012]. Die Lösung wird bei etwa pH 7.5 gepuffert, da ein großer Teil der freien OH-Ionen in Sorelphasen eingebaut wird. Cl-Ionen und überschüssige Na-Ionen aus dem NWG fallen (teilweise) als sekundärer Halit aus. In Anwesenheit von  $\text{CaCl}_2$  bzw. Ca-Ionen wird zunächst Ca-Hydroxid gebildet, welches evtl. mit Silikat zu zementartigen Ca-Silikat-Hydraten reagiert. Der pH der Lösung ist stark alkalisch. Wenn zusätzlich K-Ionen vorliegen, wird Sylvinit und sekundärer Halit gefällt. Das bei der Umwandlung von Wasserglas zu Silika-Gel gebildete Wasser wird überwiegend in neue Mineralphasen eingebaut.

## 2.2 ERFAHRUNGEN ZUR ANWENDUNG VON NATRON-WASSERGLAS IM BERGBAU

Wasserglassysteme sind ein zur Injektion von Lockersedimenten und von Rissen im Gebirge zugelassenes Injektionsmaterial gemäß DIN EN 12715 und DIN 4093. Beim Joosten-Verfahren zur Bodenverfestigung im nicht-salinaren Milieu ist zum Erhärten der Lösungen eine Zugabe von Härterlösung, z.B.  $\text{CaCl}_2$ - oder  $\text{MgCl}_2$ -Lösung, erforderlich. Viele Beispiele belegen erfolgreiche Abdichtungsinjektionen mit Wasserglas im Bergbau und im Spezialtiefbau, siehe [DBE 2008b].

Injektionen mit dem Ziel der Vergütung von Auflockerungszonen im Salzgestein wurden in der Schachanlage Asse II bereits durchgeführt [DBE 2007a], [DBE 2007b], [DBE 2008a]. Sie zeigen die prinzipielle Machbarkeit von Abdichtungsinjektionen mit Wasserglassystemen im Salzgestein. Ergebnisse von weiteren Versuchen in der Schachanlage Asse II [DBE 2012] deuten darauf hin, dass für Versatzinjektionen ein mehrstufiges Verfahren angewendet werden sollte. Eine Kombina-



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 15 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		Stand: 30.01.2016

tion aus Verdichtungs- und Poreninjektionen lässt einen hinreichenden Injektionserfolg erwarten. In der ersten Stufe des Verfahrens, der Verdichtungsinjektion, sollen die Randbereiche des Versatzkörpers verdichtet werden. Hierfür wird die Anwendung von partikelhaltigen Brucit-Suspensionen bzw. Brucit-Mörtel favorisiert. In den folgenden Stufen, den Poreninjektionen, soll der Porenraum des Salzversatzes erreicht werden. Dafür könnten sowohl feinkörnige Brucit-Suspension mit einem  $d_{85}$ -Wert von  $< 7 \mu\text{m}$  als auch partikelfreie NWG-Injektionslösung zur Anwendung kommen, wie für den Technikumsversuch gemäß Sonderbetriebsplan 24/2008 geplant.

In [DBE 2012] wurden Versuche zur Poreninjektion von NWG 50/52 in gleichkörnigem Salzgrus ausgewertet. Das NWG geliert im Kontakt mit dem Salzgrus sofort; im Innern der Poren dauert die Gelierung etwas länger. Nach mehreren Wochen ist das Silikagel vollständig erhärtet. Ob und wie weit diese Ergebnisse auf die Poreninjektion des Eigenversatzes mit heterogener Kornstruktur und Zusammensetzung übertragbar sind, wird in [DBE 2012] nicht diskutiert.

Die Untersuchungen in [DBE 2007a] zeigen einen Volumenschwund des erhärteten Silikagels gegenüber dem injizierten NWG. Dieser Volumenschwund wurde zwar nicht quantifiziert, kann aber aus den Abbildungen auf etwa 50 % abgeschätzt werden, was in etwa dem Ergebnis der in Kapitel 4.1 berechneten Volumenbilanzen entspricht. In größeren Gelkörpern bildet das erhärtete Silikagel dabei röhrenförmige Strukturen aus.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 16 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

### 3 RANDBEDINGUNGEN DES TECHNIKUMSVERSUCHS IM ABBAU 1/775 UND DATENGRUNDLAGE

Die vorliegende Stellungnahme basiert auf der Planung des Technikumsversuchs für eine mehrstufige Versatzinjektion im Abbau 1/775, welcher im Sonderbetriebsplan 24/2008 und in dessen Ergänzung über die Erweiterung der Bohrfächer beschrieben ist [Asse 2009], [Asse 2012a]. Eine umfassende Beschreibung des Versuchsablaufes sowie der geplanten Untersuchungen und Auswertungen liegt nicht vor. Die prinzipielle Versuchsanordnung ist in Abb. 2 dargestellt. Es wird gemäß den Erkenntnissen und Empfehlungen aus [DBE 2012] angenommen, dass die Versatzinjektion in diesem Versuch in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt wird:

- Verdichtungs- bzw. Abdichtungsinjektion (ADI) mit Brucit-Mörtel in Suspension und
- Poreninjektion mit NWG 50/52.

Der Brucit-Mörtel dient der Verfüllung größerer Hohlräume, beispielsweise nahe der Konturen von Versatzkörper und Abbau. Wenn die Verdichtung bzw. Abdichtung des Salzversatzes im Versuchsbereich gewährleistet ist, d.h. kein weiterer Brucit-Mörtel injiziert werden kann, gilt diese Injektion als abgeschlossen. Danach erfolgt die Poreninjektion mit NWG. Die Poreninjektion soll einstufig erfolgen, d.h. es soll eine Rezeptur NWG nach technischen Vorgaben injiziert werden. Die Injektionsbohrungen werden anschließend weitgehend von NWG befreit und mit Mörtel hochwertig verpresst, wodurch eine Abdichtung der Kontaktzone an der Bohrlochkontur erreicht wird [DBE 2012].

Eine Abschätzung der betroffenen Versatzvolumina im Abbau 1/775 und der benötigten Baustoffe erfolgte durch die Asse-GmbH [BfS 2013a]. Das während des Technikumsversuchs zu injizierende Versatzvolumen im Abbau 1/775 beträgt ca. 2650 m<sup>3</sup> mit einem Porenraum von 715 m<sup>3</sup>, was einer integralen Porosität von 27 % entspricht. Von diesem Porenraum sollen im Versuch etwa 15 % mit brucithaltigem Injektionsmörtel<sup>3</sup> und etwa 65 % mit partikelfreier Natronwasserglaslösung gefüllt werden, siehe Tab. 3. Es wurde von den Autoren abgeschätzt, dass sich in 15 % des Porenraums bereits jetzt Salzlösung befindet, und dass 5 % des Porenraums nach der Versatzinjektion mit Luft gefüllt verbleiben (vgl. auch Tab. 4). Diese Angaben zum Porenraum beziehen sich auf den zu injizierende Anteil des Versatzkörpers, der etwa ein Viertel des Abbauvolumens abzüglich des Firstspaltvolumens beträgt.

Nach den Versuchen zum Eindringvermögen von NWG in den Eigenversatz [DBE 2012] wird NWG 50/52 für den Technikumsversuch im Abbau 1/775 favorisiert, aber über die endgültige Zusammensetzung des NWG für die Poreninjektion ist noch nicht entschieden. Den Unterlagen zum Sonderbetriebsplan 24/2008 sind keine Angaben zu der chemischen Zusammensetzung des zu injizierenden NWG beigefügt, so dass entsprechende Angaben aus [DBE 2012] entnommen wurden, siehe Tab. 2. Bei einer Bandbreite für Konzentrationen ist auch eine Bandbreite für die chemische Zusammensetzung zu erwarten. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, betrifft das insbesondere

<sup>3</sup> 15 % sind ein Schätzwert für den mit Brucit-Mörtel erreichbaren Anteil des Porenraums im Versuchsbereich.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 17 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

den Wassergehalt und somit die Viskosität und Dichte. Für die folgenden Abschätzungen wird jedoch diese Abweichung bzw. Bandbreite als vernachlässigbar eingestuft. Es wird angenommen, dass NWG 50/52 gemäß [DBE 2012] im Abbau 1/775 eingesetzt wird. Das NWG 50/52 hat bei Lieferung bzw. vor dem Kontakt mit Salzgrus oder Salzlösung eine Dichte von ca. 1,55 g/cm<sup>3</sup> und eine Viskosität von ca. 1950 mPa·s. Damit können – unter der Annahme mittlerer Dichten – die Stoffmengen abgeschätzt werden, welche mit dem NWG eingebracht werden, siehe Tab. 5.

**Tab. 3:** Versatzvolumina und Porenräume im Versuchsbereich des Abbaus 1/775

Parameter	Bezugsgröße	Wert	Einheit	Bemerkungen
Volumen	Abbau 1/775	11037	m <sup>3</sup>	aus [Asse 2012b]
Volumen	Firstspalt	450	m <sup>3</sup>	geschätzt, in Anlehnung an Bohrlochinspektion IV-1.1a und IV-1.3a, vgl. Anlage 3 Folie 35 in [BfS 2013b]
Volumen	Salzversatz	10587	m <sup>3</sup>	Abbauvolumen abzüglich Firstspalt
Volumen	Versuchsbereich	2647	m <sup>3</sup>	1/4 des Abbauvolumens abzüglich Firstspalt [BfS 2013a]
Porosität	Salzversatz	0,27	-	aus [Asse 2012b]
Porenraum	Salzversatz	715	m <sup>3</sup>	[BfS 2013a]
Porenraum	Salzversatz mit Lösung gefüllt	107	m <sup>3</sup>	ca. 15 % mit Salzlösung gefüllt, insbesondere im Sohlenbereich
Porenraum	Salzversatz bleibt Luft gefüllt	36	m <sup>3</sup>	ca. 5 % des Porenraums bleiben nach Injektion mit Luft gefüllt
Porenraum	Salzversatz wird mit Mörtel gefüllt	107	m <sup>3</sup>	ca. 15 % des Porenraums wird mit Injektionsmörtel gefüllt [BfS 2013a]
Porenraum	Salzversatz wird mit NWG gefüllt	465	m <sup>3</sup>	ca. 65 % des Porenraums wird mit NWG gefüllt [BfS 2013a]

Im Abbau 1/775 liegt ein heterogen zusammengesetzter Versatzkörper vor, sowohl die Korngröße als auch die mineralogische Zusammensetzung betreffend. Das Korngrößenspektrum in alten Versatzkörpern aus dem Salzbergbau kann von feinkörnigem Pudersalz bis zu handtellergrößen Gesteinsbrocken (Beraubung und Abschaltungen) variieren und ist ggf. lokal von Fremdkörpern - z.B. Holz - durchsetzt. Der Versatzkörper im Versuchsbereich von Abbau 1/775 ist durch Risse mit Öffnungsweiten bis zu ca. 10 mm gekennzeichnet, vgl. Anlage 3, Folie 35 in [BfS 2013b].

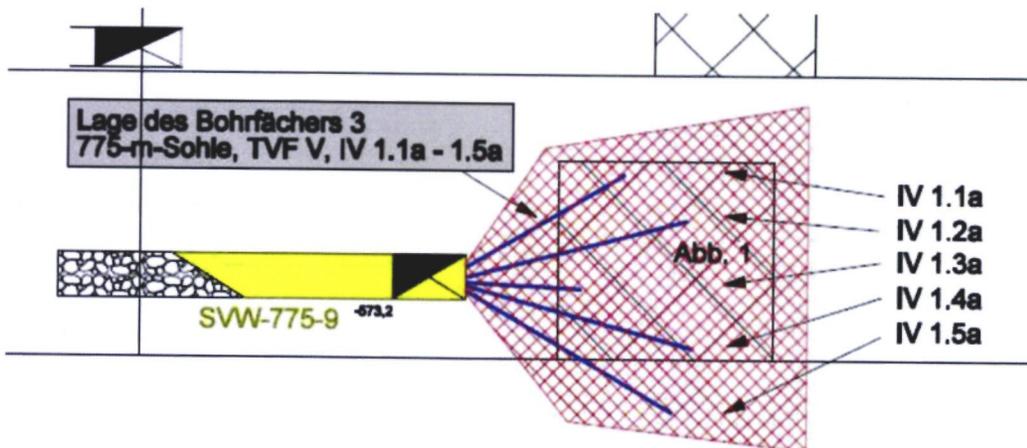
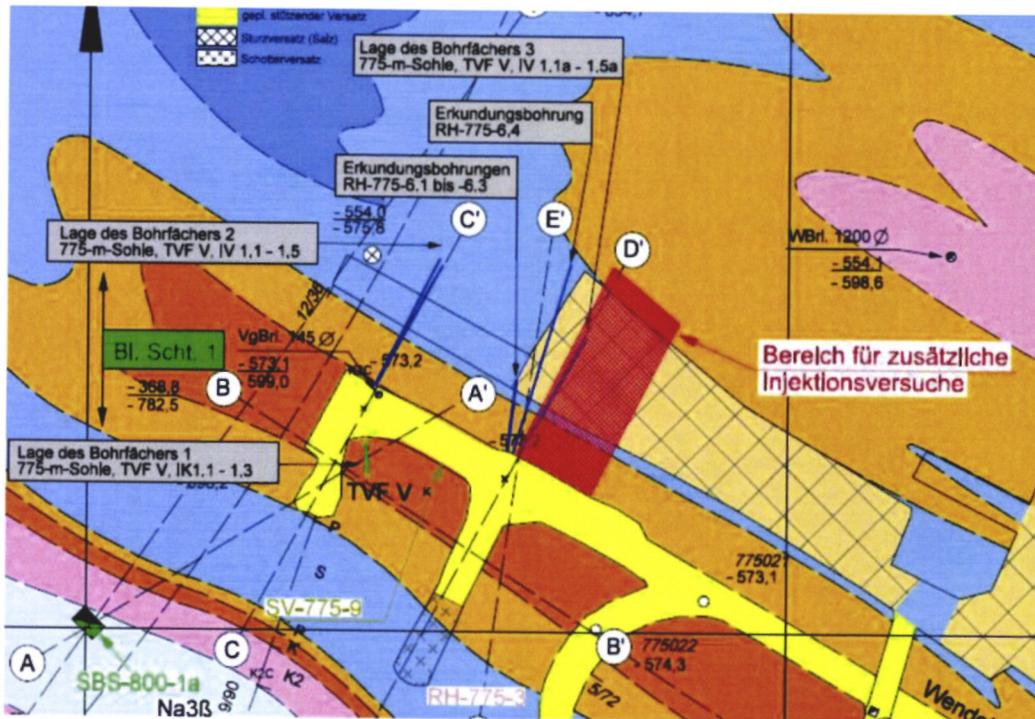


Bundesamt für Strahlenschutz

# Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachtanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 18 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	

Stand: 30.01.2016



**Abb. 2:** Versuchsbereich und Anordnung des Bohrträgers für die Versatzinjektionen im Abbau 1/775, nach [Asse 2012a]

Der Versatz besteht überwiegend aus Steinsalz, es kommen wahrscheinlich auch Kalisalze vor. Abb. 2 zeigt, dass der Salzabbau bis zum Kontakt von Staßfurt-Steinsalz (blau) und polyhalitischem Übergangssalz (orange), welches am Nord- und Südstoß von Abbau 1/775 aufgeschlossen ist, erfolgte. In den benachbarten Strecken ist auch kieseritisches Übergangssalz (braun) aufgeschlossen. Durch das Berauben der Konturen vor dem Verfüllen des Abbaus können polyhalitische und kieseritische Übergangssalze in den Versatzkörper gelangt sein. Die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Versatzkörpers ist den vorliegenden Unterlagen zum Versuchsbereich nicht zu entnehmen.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 19 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

**Tab. 4:** Prozentuale Aufteilung der Porenfüllung im Versatzkörper des Versuchsbereiches nach der Versatzinjektion (Schätzwerte)

Salzversatz	73 %	
initialer Porenraum	27 %	
	<b>Anteil am Gesamt-</b>	<b>Anteil am initialen Poren-</b>
	<b>volumen</b>	<b>raum</b>
Lösung im Sohlenniveau	4,05 %	15 %
luffterfüllte Poren	1,35 %	5 %
mit Brucit-Mörtel gefüllte Poren	4,05 %	15 %
mit NWG gefüllte Poren	17,55 %	65 %

**Tab. 5:** Stoffmengen NWG im Versuchsbereich von Abbau 1/775 (Schätzwerte)

Parameter	Einheit	NWG 37/40	NWG 50/52
Gesamtvolumen Wasserglas	m <sup>3</sup>	465	465
Gesamtmasse Wasserglas	kg	632400	725400
Gesamtmasse Na <sub>2</sub> O	kg	51857	102281
Gesamtmasse SiO <sub>2</sub>	kg	172645	246636
Gesamtmasse H <sub>2</sub> O	kg	407898	376483
Gesamtmenge Na <sub>2</sub> O	mol	836683	1650259
Gesamtmenge SiO <sub>2</sub>	mol	2873383	4104833
Gesamtmenge H <sub>2</sub> O	mol	22641780	20897960
Menge Na <sub>2</sub> O, normiert	mol/m <sup>3</sup>	316	623
Menge SiO <sub>2</sub> , normiert	mol/m <sup>3</sup>	1086	1551
Menge H <sub>2</sub> O, normiert	mol/m <sup>3</sup>	8554	7895

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachtanlage Asse II</b>					
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.				
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 20 von 39			
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016			

Der unterste Teil des Versatzkörpers ist lösungsgesättigt. Es wird angenommen, dass die Lösung nicht nur an Halit und Anhydrit, sondern auch an Polyhalit gesättigt ist. Nicht auszuschließen ist, dass diese Lösung merkliche Konzentrationen an  $MgCl_2$  und  $MgSO_4$  enthält, da die Lösung über dem Abbau 1/775 kieseritische und carnallitische Versatz- und Gesteinskörper kontaktierte. Die durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Lösung ist den vorliegenden Unterlagen zum Versuch ebenfalls nicht zu entnehmen.

Der Kontakt anstehender  $MgCl_2$ -haltiger Lösung mit NWG hätte keine negativen Auswirkungen auf das Erhärten der Injektionslösung. Die Anwesenheit der Lösung muss jedoch bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden, weil eine solche Lösung wie eine Härterlösung wirkt – vgl. Joosten-Verfahren – und somit das Versuchsergebnis beeinflussen kann.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 21 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

## 4 CHEMISCH-MINERALOGISCHE ASPEKTE

In diesem Kapitel werden die chemisch-mineralogischen Aspekte diskutiert, die zum einen durch die Injektionen des Salzversatzes hervorgerufen werden und zum anderen infolge der Notfallmaßnahme des Gegenflutens mit  $MgCl_2$ -reicher Lösung – R-Lösung bzw. IP19-Lösung gemäß [Asse 2010] – mit dem NWG im injizierten Versatzkörper ausgelöst werden können. Sie dienen als Basis für die im Kapitel 6 getroffenen Aussagen.

Im Gegensatz zu den in Kapitel 2.1 erwähnten „magischen Kristallgärten“ sind im Versuch die Volumenverhältnisse umgekehrt. Die Steinsalzmenge überwiegt bei Weitem die Wasserglasmenge. Der Prozess des Aushärtens ist jedoch vergleichbar. Nach den Versuchsergebnissen aus [DBE 2011] kommt es im unmittelbaren Kontakt zwischen NWG, Salzgrus und Salzlösung zur Agglomeration der Kieselsäure und Bildung gelartiger Membranen bzw. (röntgen)amorpher Silika-Gele. Im Innern der Hohlräume verbleibt das NWG eventuell etwas länger als kolloidale Lösung, erhärtet mit der Zeit aber auch dort infolge der in Kapitel 2.1 genannten osmotischen Prozesse. Die zum Erhärten des NWG notwendige(n) Reaktion(en) werden durch den Salzversatz gewährleistet; anstelle der Härterlösung wie beim Joosten-Verfahren soll hier der Salzversatz aufgrund der hohen Ionenstärke eine Aggregation und Kondensation der Kieselsäure bewirken [DBE 2011]<sup>4</sup>.

Im Kontakt zwischen Wasserglas und die Pore umschließendem Salz wird sich eine Membran ausbilden (s.o.). Wegen der osmotischen Verhältnisse besteht die Tendenz, dass das Wasser aus dem Inneren der von der Membran umschlossenen Pore zum Salz transportiert wird und dieses löst. Die Quantifizierung hängt von der Menge des Wassers und von der sich bildenden festen Phase ab. In größeren Kanälen bzw. Poren könnte diese Membran den Kontakt zwischen Salz und NWG behindern, da sie zwar durchlässig für Wasser, nicht aber für gelöste Ionen ist und somit die Erhärtung des NWG verzögert. In dem Fall wäre der Einsatz einer Härterlösung notwendig. Erfahrungen aus den Injektionsmaßnahmen in der Schachanlage Asse [DBE 2008a] etc. deuten an, dass solche Situationen eintreten können, aber technisch handhabbar sind. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass bei Abdichtungsinjektionen von Auflockerungszonen sowohl die Klüftöffnungsweiten als auch die injizierten Mengen an Wasserglas deutlich geringer sind als bei der geplanten Poreinjektion im Abbau 1/775. Die Übertragbarkeit der Erfahrungen aus den Abdichtungsinjektionen auf die geplante Poreinjektion ist nur bedingt möglich.

### 4.1 VOLUMENBILANZEN

Die Abschätzungen in diesem Kapitel erfolgen zuerst auf Grundlage eines idealisierten Systems aus reinem Steinsalzversatz und NWG. Die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Versatzes im Versuchsbereich ist den vorliegenden Unterlagen nicht zu entnehmen, so dass die Anteile an Kalisalzen nicht abgeschätzt werden können. Auf deren Auswirkungen wird an-

<sup>4</sup> Geht man davon aus, dass nur Halit im Versuchsbereich vorliegt, stünde außer  $Na^+$  kein Kation zur Verfügung, das die freiwerdenden  $OH^-$ -Ionen des NWG ausfallen könnte. Das resultierende NaOH würde in hoher Konzentration in der Lösung verbleiben. Im Salzversatz des Versuchsbereiches kommen jedoch Kalisalze, wie Polyhalit und Kieserit, sowie  $MgCl_2$ -haltige Lösung vor, so dass  $Mg^{2+}$ - und  $Ca^{2+}$ -Ionen vorliegen.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>			<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 22 von 39 Stand: 30.01.2016
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	

schließlich hingewiesen. Die Abschätzungen dienen ausschließlich zur Orientierung und können nicht auf das reale System im Versuchsbereich übertragen werden.

Ausgehend von NWG 50/52 und amorpher Kieselsäure im Verhältnis  $\text{SiO}_2$  zu  $2\text{H}_2\text{O}$  mit einer Dichte von  $1,8 \text{ g/cm}^3$  bei einer Molmasse von  $96,1 \text{ g/mol}$  entstünden aus  $465 \text{ m}^3$  NWG ca.  $220 \text{ m}^3$  Festphase und ca.  $230 \text{ m}^3$  Wasser<sup>5</sup>. Die Wassermenge entspricht  $8,6 \%$  und das Volumen der gebildeten amorphen Kieselsäure  $8,3 \%$ , bezogen auf das gesamte Hohlräumvolumen. Darüber hinaus besitzt die Wassermenge das Potenzial zur Lösung von Salzversatz. Unterstellt man ausschließlich Steinsalz (Halit) im Versuchsbereich, was angesichts der Dominanz von Halit für diese Schätzung zulässig ist, und berücksichtigt man, dass durch die hohe NaOH-Konzentration aufgrund der initialen Zusammensetzung des NWG nur noch ca.  $4 \text{ mol}$  Halit pro  $\text{kg H}_2\text{O}$  gelöst werden können, würden durch freigesetztes Wasser zusätzlich ca.  $25 \text{ m}^3$  Feststoffanteil des Salzversatzes gelöst. Das entspräche einer zusätzlichen Porosität von  $0,9 \%$ .

Die amorphe, wasserhaltige Festphase (Silika-Gel) wird sich durch Kondensation in wasserärmere Kieselgesteine und möglicherweise langfristig in  $\alpha$ -Quarz umwandeln. Dabei würde sich das Feststoffvolumen um  $126 \text{ m}^3$  auf  $93 \text{ m}^3$  verringern und zusätzlich  $148 \text{ m}^3$  Wasser frei, welches weiteren Salzversatz lösen würde, siehe Tab. 6. Das Gesamtvolumen der beteiligten Stoffe nähme im Verlauf der Erhärtung bzw. Umwandlungsreaktionen zu, so dass das Volumen NWG geringer wäre als das Volumen der sich bildenden Festphasen und des freigesetzten Wassers.<sup>6</sup>

Das Volumenverhältnis der Porenfüllungen würde sich mit der Umwandlung von NWG über amorphes, wasserhaltiges Silika-Gel zu kristallinem, wasserfreiem Quarz ändern, vgl. Kapitel 2.1. Es zeigt sich, dass mit der Bildung des Silika-Gels  $\text{SiO}_2:2\text{H}_2\text{O}$  nur ca.  $50 \%$  des mit NWG 50/52 injizierten Porenraums gefüllt bliebe, mit der langfristigen Bildung von Quarz sogar nur  $20 \%$ . Die integrale Porosität des Versatzkörpers würde sich dadurch – rein rechnerisch – kurzzeitig von  $27 \%$  auf ca.  $16 \%$  verringern, langfristig (ohne Konvergenz) wieder auf ca.  $22 \%$  erhöhen. Diese theoretischen Berechnungen dienen nur der Orientierung und sind nicht auf das langzeitige Systemverhalten am Standort Asse übertragbar, da

- Versatzkörper nicht nur aus Halit bestehen,
- beim Kontakt mit  $\text{MgCl}_2$ -haltiger Lösung (Zutritts- und Betriebslösungen) durch Reaktion mit hochalkalischer Porenlösung u.a. Brucit und Magnesiumoxichlorid ausfallen werden,
- bei  $\text{CaCl}_2$  in der Lösung neben Brucit und Sorelphasen weitere Mineralphasen, die  $\text{OH}^-$ -Ionen einbauen, gebildet werden.

In realen Versatzkörpern – wie im Versuchsbereich – liegen nicht nur Na-Ionen sondern auch Mg-, K- und Ca-Ionen vor, so dass Mineralneubildungen wahrscheinlich sind (vgl. Kapitel 2.1). Der

<sup>5</sup> Darin gelöstes NaOH ist in dieser Volumenbilanz nicht eingerechnet. Annähernd wird das Lösungsvolumen dem Volumen eingesetzten Wasserglases abzüglich der sich daraus bildenden Festphase entsprechen.

<sup>6</sup> Würde sich bei der Erhärtung anstelle des  $\text{SiO}_2:2\text{H}_2\text{O}$  eine Natriumsilikathydratphase bilden, wären die Volumenverhältnisse quantitativ verändert, qualitativ jedoch vergleichbar. Auf eine Betrachtung wird wegen der ungewissen Zusammensetzungen verzichtet.

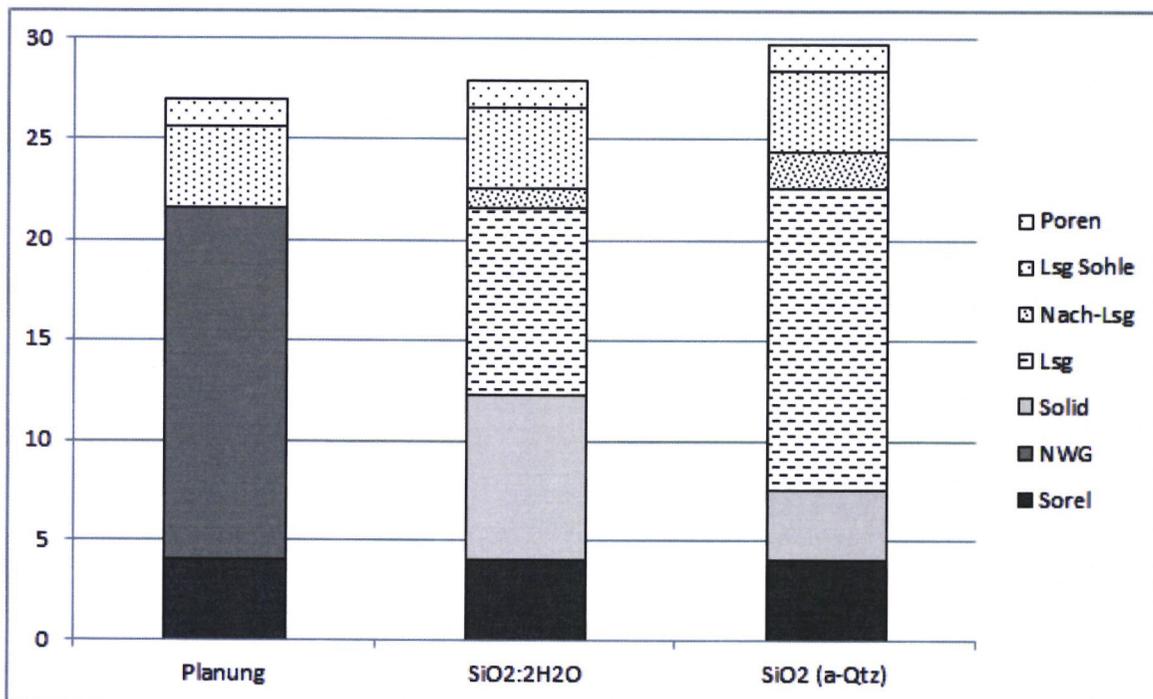


Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachtanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 23 von 39	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

größte Teil des bei der Umwandlung von NWG 50/52 zu Silika-Gel gebildeten Wassers wird in die neuen Mineralphasen eingebaut. Untersuchungen hierzu sowie eine durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Salzversatzes liegen bisher nicht vor, so dass die sich neu bildenden Mineralphasen und deren Stöchiometrie nicht bekannt sind. Aus dem Grund ist es unmöglich, realistische Mengen- bzw. Volumenbilanzen für den Versatzkörper im Versuchsbereich abzuschätzen. Die dargelegten theoretischen Berechnungen unterschätzen die Mineralneubildung und überschätzen das Volumen an freiem Wasser deutlich.



**Abb. 3:** Volumenverhältnis der Porenfüllungen bei der Umwandlung von NWG 50/52 über Silika-gel zum Quarz, idealisiert bei Anwesenheit von ausschließlich Halit.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 24 von 39 Stand: 30.01.2016	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		

**Tab. 6:** Stoffmengen und deren Änderungen für NWG 50/52 im Versuchsbereich

Parameter	Einheit	Wert	Anteil [%], bezogen auf Gesamtvolumen
Initial: NWG			
Gesamtvolumen NWG	m <sup>3</sup>	465	17,6
Gesamtmenge Na <sub>2</sub> O	mol	1650259	
Gesamtmenge SiO <sub>2</sub>	mol	4104833	
Gesamtmenge H <sub>2</sub> O	mol	20897960	
kurzzeitige Umwandlung: Erhärtung zu Silika-Gel mit SiO <sub>2</sub> :2H <sub>2</sub> O			
Volumen SiO <sub>2</sub> :2H <sub>2</sub> O	m <sup>3</sup>	219	8,3
verbleibendes H <sub>2</sub> O aus NWG	mol	12688295	8,6*
	m <sup>3</sup>	229	
verbleibender Porenraum (NWG - SiO <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O)	m <sup>3</sup>	246	9,3
NaCl-Lösekapazität**	m <sup>3</sup>	25	0,9
totaler Porenraum	m <sup>3</sup>	271	10,2
langzeitige Umwandlung: Kondensation bis zur Rekristallisation von Quarz			
Volumen SiO <sub>2</sub> (α-Quarz)	m <sup>3</sup>	93	3,5
Reduktion Festphase = Porenraum	m <sup>3</sup>	126	4,8
freiwerdendes H <sub>2</sub> O aus SiO <sub>2</sub> :2H <sub>2</sub> O	mol	8209665	5,6
	m <sup>3</sup>	148	
totales H <sub>2</sub> O	mol	20897960	8,6*
	m <sup>3</sup>	337	
NaCl-Lösekapazität***	m <sup>3</sup>	25	0,9
Porenraum total		397	5,7

\* Volumen für reines Wasser wäre theoretisch wegen Lösungsinhaltstoffen – wie NaOH – größer.

\*\* 4 mol/l wegen NaOH

\*\*\* 6 mol /l

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 25 von 39 Stand: 30.01.2016	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		

## 4.2 CHEMISCH-MINERALOGISCHE ASPEKTE WÄHREND DES GEGENFLUTENS

Die Abschätzungen in diesem Kapitel erfolgen aufgrund der geplanten Gegenflutung der Grube mit einer  $MgCl_2$ -reichen Lösung (R-Lösung unterhalb und Q-Lösung oberhalb der 700-m-Sohle) als Notfallmaßnahme beim Eintreten eines AÜL. Da die mineralogische Zusammensetzung des Salzversatzes in der Grube sehr heterogen ist und eine durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung für einzelne Grubenbaue – wie dem Versuchsbereich – bzw. für Grubenbereiche den vorliegenden Versatzunterlagen nicht zu entnehmen ist, können die Anteile an Kalisalzen im Versatz nicht abgeschätzt werden. Aufgrund dessen können die folgenden Abschätzungen nur qualitativen Charakter tragen. Quantitative Abschätzungen von Mengen- und Volumenbilanzen für reale Versatzkörper sind nicht sinnvoll.

Im Ergebnis der Gegenflutung wird  $MgCl_2$ -reiche Lösung in injizierte Versatzkörper gelangen. Die Lösung wird die Versatzkörper aufgrund der Spannungsverhältnisse im Grubengebäude und des Fluiddrucks vollständig erreichen und mit eventuell noch nicht erhärtetem NWG 50/52 oder Silika-Gel  $SiO_2 \cdot 2H_2O$  in Kontakt gelangen. Da  $MgCl_2$ -reiche Lösung in etwa die Wirkung einer Härterlösung – vergleichbar dem Joosten-Verfahren – ausübt, wird das NWG spätestens dann erhärten, wobei Silika-Gel und Mg-Oxychloride (Sorelphasen) gebildet werden. Im Kontakt mit Silika-Gel  $SiO_2 \cdot 2H_2O$  werden u. a. Sorelphasen gebildet.

In Anwesenheit von Halit und Brucit – z. B. aus dem Brucit-Mörtel der Verdichtungsinjektion, sofern der Brucit nicht bereits in Sorelphasen umgewandelt ist – wird  $NaCl$  aus dem Salzversatz oder Salzgestein nachgelöst [INE 2006], und Sorelphasen werden gebildet. Je nach Sättigungsgrad der  $MgCl_2$ -reichen Lösung können außerdem Kalisalze, wie Polyhalit oder Kieserit, aufgelöst werden. Bei diesen Lösungsprozessen kommen chemische Reaktionen vor, die einerseits eine Volumenzunahme der Feststoffe bewirken können, andererseits aber auch eine Volumenabnahme. Eine zuverlässige Abschätzung des Porenvolumens in einem Versatzkörper – wie im Versuchsbereich – ist nur möglich, wenn die mineralogische Zusammensetzung des Versatzkörpers und die Mengen der Kalisalze im Durchschnitt bekannt sind. Ohne diese Kenntnisse ist eine Prognose der Entwicklung des Porenvolumens nicht sinnvoll.

Qualitativ finden in mit NWG injizierten Versatzkörpern u. a. folgende Reaktionen statt: Gemäß der Gleichung 4 können sich analog zu Portlandit bei  $MgCl_2$ -reicher Salzlösung Brucit und fortlaufend Sorelphasen bilden. Mit Kieselsäure können sich Magnesiumsilikathydrat-Phasen (MSH) bilden. Die Mengenverhältnisse der Reaktanden bestimmen, welche der Festphasen chemisch stabil bleiben. Bei Überschuss von  $MgCl_2$  entstehen Sorelphasen und MSH sowie annähernd neutrale pH-Werte der Lösung. Läge dagegen ein deutlicher Überschuss von NWG vor, dann bliebe der pH der Lösung im alkalischen Bereich. Falls die Mg-Konzentration in Lösung unter 0,5 molal absinken würde, wären Sorelphasen nicht mehr stabil und Brucit würde ausfallen. Überschlägige Modellrechnungen, bei denen Kurshunovskit (3-1-8 Sorelphase) mit R-Lösung bzw. IP21-Lösung equilibriert wurde und dann  $NaOH$ -Lösung titriert wurde, zeigen, dass erst ab einer ca. 5 molalen  $NaOH$ -Konzentration Brucit gebildet wird. Die Sorelphase bleibt im Wesentlichen stabil. Auch bei ca. 10 molaler  $NaOH$ -Konzentration sind noch 80 % der ursprünglichen Sorelphase stabil. Eine

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachtanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 26 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

signifikante Umwandlung von Sorelphasen, welche u. a. aus injiziertem Brucit entstehen können oder im Sorelbeton eines technischen Bauwerks vorliegen, ist unwahrscheinlich.

Kommt es nach der Bildung von Silika-Gel zum Kontakt mit  $MgCl_2$ -reichen Salzlösungen, ist die Bildung neuer MSH-Phasen möglich. Solche Minerale bilden sich auch in der Natur aus einer silikathaltigen Lösung oder über eine stark lösliche Silikat-Phase als Vorläufer, siehe [STO 1988]. Über die Bildung einer MSH-Phase im Kontakt von NWG mit  $NaCl$ - $MgCl_2$ -Lösung wird auch in [DBE 2012] berichtet. Die genaue Zusammensetzung der Phase konnte nicht eindeutig geklärt werden. Im Kontakt von NWG mit Q-Lösung wurde eine solche MSH-Phase nicht beobachtet. Die primär gefällten MSH-Phasen sind allerdings mikrokristallin oder amorph und daher schwer nachzuweisen, weshalb ihre Bildung – zumindest in geringer Menge – nicht ausgeschlossen wird.

Bei einem auslegungsüberschreitenden Lösungszutritt ist der Zufluss von Deckgebirgslösung in den Versuchsbereich unwahrscheinlich. Entweder erfolgt die Gegenflutung mit  $MgCl_2$ -reicher Lösung, oder die aus dem Deckgebirge zutretende Lösung gelangt in der Grube in Kontakt mit Kalisalzen und nimmt zumindest  $Mg$ -Ionen auf.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 27 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

## 5 AUSWIRKUNGEN AUF DIE LANGZEITSICHERHEIT

Eine Bewertung hinsichtlich der Langzeitsicherheit erfolgt hier für die geplante Versatzinjektion des Eigenversatzes mit Brucit-Mörtel und NWG 50/52 im westlichen Teil des Abbaus 1/775. Des Weiteren werden generelle Aussagen zu möglichen Auswirkungen derartiger Versatzinjektionen auf das Systemverhalten im Bereich der Einlagerungskammern diskutiert. Es werden folgende Aspekte angesprochen:

- gebirgsmechanische Verhältnisse, z.B. Kompaktierbarkeit und Stützwirkung des Versatzkörpers
- hydraulische Verhältnisse, z.B. Strömungswiderstand des Versatzkörpers
- transportwirksame Volumina
- Milieuwechsel im Umfeld von Abbau 1/775
- Radionuklidtransport
- Langzeitstabilität

Die generellen Aussagen zu Auswirkungen von Versatzinjektionen auf das Systemverhalten im Nahbereich der Einlagerungskammern tragen orientierenden Charakter, da bisher keine quantitativen Abschätzungen bei realitätsnahen Standortbedingungen durchgeführt werden konnten. Dies liegt vor allem daran, dass die relevanten Standortbedingungen – wie beispielsweise die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung der Versatzkörper – nicht bekannt sind und dass die Einbauorte für Versatzinjektionen, einschließlich Poreninjektionen, noch nicht festgelegt worden sind.

Der Übertritt von NWG 50/52 bzw. Silika-Gel aus Abbau 1/775 in eine ELK auf der 750-m-Sohle ist auszuschließen. Sofern NWG 50/52 vor dem Erhärten aus dem Versuchsbereich gepresst werden sollte, wird es entweder im nicht injizierten Salzversatz im Abbau 1/775 bzw. in einer angrenzenden Auffahrung oder im aufgelockerten Salzgestein der Pfeiler oder Schweben des Abbaus erhärten.

Die Bildung von NaOH (Natronlauge) bei der Kondensation des NWG ist im Versuchsbereich begrenzt, da im Versatzkörper Mg- und Ca-haltige Minerale vorkommen, die zur Ausfällung von Hydroxiden führen. Gebildete Natronlauge ist zwar mobil, müsste aber vor der Gegenflutung den gesamten Porenraum des Abbaus 1/775 und (mindestens) der benachbarten Abbaue 2/775 und 3/775 auffüllen, um in das Hangende zur 750-m-Sohle ausgepresst werden zu können. Das ist auszuschließen. Spätestens bei der Gegenflutung wird mobile Natronlauge in Kontakt mit MgCl<sub>2</sub>-Lösung gelangen, so dass Brucit (Mg(OH)<sub>2</sub>) ausfällt. Das Abfließen von Natronlauge in eine der LAW-ELK ist auszuschließen.

Die Umwandlung von Brucit zu Sorelphasen puffert das chemische Milieu im Nahbereich der ELK, zu dem Abbau 1/775 gerechnet werden kann, im schwach alkalischen bis neutralen pH-Bereich. Dies wurde bereits als positiv bewertet [INE 2006].

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 28 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

## 5.1 GEBIRGSMECHANISCHE VERHÄLTNISSE

### 5.1.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775

Durch Verfüllen des Firstspalts von Abbau 1/775 und der Hohlräume zwischen Versatzkörper und Abbaukontur mit Brucit-Mörtel im Ergebnis der Verdichtungsinjektion werden die Konturen der Pfeiler und Schwebe stabilisiert. Die Verdämmung der Kreuzungsbereiche von Pfeilern und Schwebe durch die Verfüllung bewirkt eine gebirgsmechanische Stabilisierung des Tragsystems im Grubenbereich. Dadurch wird die Ausbildung von Scherzonen in den Kreuzungsbereichen und in der Schwebe behindert.

Die Verdichtung des Salzversatzes, der gegenwärtig eine mittlere Porosität von 27 % aufweist, als Folge der Verdichtungsinjektionen erfolgt nach [DBE 2012] nur in geringem Ausmaß, verbunden mit einer geringen Abnahme der integralen Porosität des Versatzkörpers, so dass keine relevante Erhöhung der Stützwirkung des Versatzes erwartet wird. Die Poreinjektionen mit NWG 50/52 bewirken eine weitere Verringerung der Porosität bzw. des konvergenzaktiven Volumens im Versatzkörper, so dass die Konvergenz des Abbaus 1/775 reduziert wird. Ob durch die Poreinjektion eine erhöhte Stützwirkung dieses Versatzkörpers erreicht wird, ist bisher nicht belegt.

Der Versuch hätte keine negativen Auswirkungen auf die gebirgsmechanische Situation in dem Grubenbereich.

### 5.1.2 Allgemeine Aussagen zu den Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit

Versatzinjektionen, einschließlich der Hohlräumverfüllungen und der Verdichtungsinjektionen, bewirken grundsätzlich eine Konturstabilisierung des Tragsystems und eine Verringerung der konvergenzaktiven Volumina. Infolge dessen verringert sich die Konvergenz der betroffenen Grubenbereiche. Wie in Kapitel 4.1 gezeigt, würde sich durch Poreinjektionen mit NWG die mittlere Porosität der Versatzkörper verringern. Eine geringere mittlere Porosität bewirkt sowohl geringere Konvergenzraten und Volumenströme – vor allem zu frühen Zeiten – als auch geringere konvergenzwirksame Volumina, d. h. langfristig geringere Lösungsvolumina, die ausgepresst werden können.

Ob durch die Poreinjektionen mit vertretbarem technischem Aufwand eine relevante Verringerung der mittleren Porosität eines Versatzkörpers gegenüber der mittleren Porosität im Ergebnis von Verdichtungsinjektionen erreicht werden kann, und ob sich dies signifikant auf die auspressbaren Lösungsmengen und Volumenströme nach der Stilllegung auswirkt, ist bisher nicht belegt.

Im Nahbereich der ELK sind diese Auswirkungen der Versatzinjektionen grundsätzlich als positiv zu bewerten.

Ungewissheiten bei Mineralumwandlungen von Silika-Gel zum Quarz oder auch von Brucit zu Sorelphasen und MSH-Phasen – sowohl im Umfang als auch im zeitlichen Ablauf – sind nach-

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          SchachanlageASSE II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 29 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

rangige Einwirkungen auf eine quantitative Prognose der Volumenveränderung und erschweren diese. Es ist nicht auszuschließen, dass langzeitige Veränderungen des Porenvolumens durch die Konvergenz überdeckt werden.

## 5.2 HYDRAULISCHE VERHÄLTNISSE

### 5.2.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775

Die hydraulischen Verhältnisse nach der Stilllegung im Bereich von Abbau 1/775 werden durch die geplante Versatzinjektion nicht signifikant beeinflusst. Der injizierte Versatzkörper im westlichen Teil des Abbaus (Versuchsbereich) – mit geringem strömungswirksamen Porenvolumen und wahrscheinlich relativ hohem Strömungswiderstand – wird über den nicht injizierten Salzversatz im östlichen Teil des Abbaus – mit großem strömungswirksamen Porenvolumen und relativ geringem Strömungswiderstand – umströmt.

Das lösungserfüllte Volumen im Versuchsbereich ist schon im Vergleich zum Gesamtvolumen auf der 775-m-Sohle zu klein, als dass sich Veränderungen des Feststoff- oder Lösungsvolumens merklich auf die Volumenströme bzw. das Strömungsmuster in diesem Grubenbereich nach der Stilllegung auswirken können.

### 5.2.2 Allgemeine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit

Versatzinjektionen werden sich auf Strömungswiderstände und somit auf das Strömungsmuster eines Grubenbereiches nach der Stilllegung auswirken, wenn der gesamte Fließquerschnitt eines mit Salzversatz verfüllten Grubenbaus – bestehend aus Salzversatz und Auflockerungszonen in der Kontur – in relevanter Strömungsrichtung durch die Injektionen erreicht wird. Andernfalls wird der injizierte Versatz umströmt.

Ob eine Versatzinjektion das Strömungsmuster relevant beeinflusst und ob dieser Einfluss auf Lösungsbewegung und Transport positiv oder negativ ist, kann nur anhand konkreter Angaben zu Ort und Volumen eines injizierten Versatzkörpers bewertet werden. Konkrete Planungen dazu liegen noch nicht vor.

Wenn z. B. im direkten Zuflusspfad einer Einlagerungskammer (ELK) die Versatzinjektion erfolgt, wird das konvergenzwirksame Lösungsvolumen und somit der Volumenstrom zur ELK verringert, wodurch der Lösungsaustausch im Porenvolumen der ELK und jeglicher Stofftransport aus der ELK reduziert wird. Erfolgt dagegen eine Versatzinjektion im direkten Abflusspfad einer ELK, wird zwar auch dort das konvergenzwirksame Lösungsvolumen und der fortlaufende Volumenstrom verringert, aber auch das verdünnungs- und transportwirksame Lösungsvolumen auf dem Transportpfad reduziert. Diese Auswirkungen betreffen nicht nur die Hydraulik, sondern auch den Stofftransport (nächstes Kapitel).

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 30 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

Im Abfluss- bzw. Transportpfad aus einer ELK können sich Kanalisierungseffekte negativ auf die Lösungsbewegung (und den Transport) auswirken. Durch Verdichtungsinjektionen (mit Brucit-Suspensionen) werden bevorzugt die weniger verdichteten bzw. höher durchlässigen Bereiche des Versatzkörpers erreicht, wodurch die Kanalisierung der Lösungsbewegung im Versatzkörper eingeschränkt wird. Sollte bei den nachfolgenden Poreinjektionen (mit NWG) jedoch nicht der gesamte Versatzkörper erreicht werden, können nicht injizierte Bereiche des Versatzkörpers Kanalisierungsbahnen bilden, in denen der Transport beschleunigt und das verdünnungswirksame Lösungsvolumen deutlich reduziert wird. Diese Auswirkungen betreffen nicht nur die Hydraulik, sondern auch den Stofftransport (nächstes Kapitel).

## 5.3 EINFLUSS AUF TRANSPORTPROZESSE

### 5.3.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775

Nach der Stilllegung und Gegenflutung wird der Abbau 1/775 in einem Zuflusspfad des ELB LAW1A bzw. der ELK 2/750(Na<sub>2</sub>) liegen. Es ist nicht auszuschließen, dass die aus dem Abbau 1/775 ausgepresste Lösung über die benachbarten Abbaue 2/775 und 1/750(Na<sub>2</sub>) in die ELK 2/750(Na<sub>2</sub>) gelangt und dadurch den Lösungsaustausch im Porenvolumen der ELK beeinflusst. Die Reduzierung des konvergenzaktiven Volumens im Abbau 1/775 kann eine Verringerung des Lösungsaustausches in der ELK 2/750(Na<sub>2</sub>) bewirken.

Auf dem o. g. Zuflusspfad kann sich jedoch die Fließrichtung temporär umkehren, wie einige Modellrechnungen aufzeigen. In diesem Fall wird der Abbau 1/775 Teil eines Transportpfads aus der ELK 2/750(Na<sub>2</sub>), der aber nur von untergeordneter Bedeutung für den Radionuklid-Transport ist. Auf diesem temporären Transportpfad wird sich durch die Versatzinjektion das verdünnungs- und transportwirksame Porenvolumen verringern.

Die Veränderungen durch die geplanten Versatzinjektionen im Versuchsbereich werden als nicht relevant für den Radionuklid-Transport erachtet. Der Versuchsbereich ist zu klein.

### 5.3.2 Allgemeine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit

Die Bewertung einer Versatzinjektion hinsichtlich der Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit hängt vor allem davon ab, ob (a) der injizierte Versatzkörper auf dem Zuflusspfad einer ELK liegt oder Teil eines Transportpfads für Lösung aus einer ELK ist (siehe oben), und (b) ob durch die Injektionen Änderungen des chemischen Milieus hervorgerufen werden, die sich auf Mobilisierung bzw. Rückhaltung von Radionukliden und anderen Schadstoffen auswirken (siehe unten). Auf einem Transportpfad für kontaminierte Lösungen ist die Abwägung vorzunehmen, ob einer Reduzierung des Porenvolumens verbunden mit der Verringerung von Konvergenz und Volumenstrom oder einem größeren verdünnungs- und transportwirksamen Porenvolumen – beim Verzicht auf die Versatzinjektion – der Vorzug zu geben ist.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 31 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

Inwieweit eine Versatzinjektion den Transport positiv oder negativ beeinflussen wird, kann nur anhand konkreter Angaben zum Einbauort eines zu injizierenden Versatzkörpers bewertet werden. Konkrete Planungen dazu liegen nicht vor.

## 5.4 MILIEU

### 5.4.1 Versuchsbereich im Abbau 1/775

Durch die Injektionen von Brucit-Mörtel (Verdichtungsinjektion) und von NWG (Poreinjektion) wird das chemische Milieu im Versuchsbereich von Abbau 1/775 spätestens nach der Gegenflutung deutlich in den alkalischen pH-Bereich verschoben – über die Pufferung durch Sorelphasen bei ca. pH 8. Gesicherte Prognosen über das chemische Milieu des Lösung-Feststoff-Systems vor der Gegenflutung sind nicht möglich, da keine gesicherten Erkenntnisse über die Kalisalze im Versatzkörper und damit über den Verbleib des NaOH (aus der Umwandlung des NWG zum Silika-Gel) in der Lösung oder den Einbau von Hydroxid-Ionen in Festphasen, wie Brucit, Sorelphasen oder Ca-haltige Äquivalente, gibt.

Ein späterer Zufluss von MgCl<sub>2</sub>-haltiger Lösung wird auf die injizierten Baustoffe einen geringen Einfluss haben. Brucit und Sorelphasen aus der Verdichtungsinjektion sind in solchen Lösungen entweder stabil oder bewirken eine Umwandlung von Brucit in Sorelphasen – je nach pH-Wert der Lösung. Nach der Erhärtung des NWG kann davon ausgegangen werden, dass Reaktionen zwischen Silika-Gel und Grubenlösung zumindest sehr stark kinetisch gehemmt sind. Die Bildung von MSH-Phasen erfolgt wahrscheinlich nicht in großem Umfang.

Das Auspressen von konvertierter alkalischer Lösung aus dem Versuchsbereich hat keinen signifikanten Einfluss auf das geochemische Milieu in einer ELK. Einerseits ist das konvertierte Lösungsvolumen gering und andererseits kann die Lösung nicht direkt in eine ELK gelangen. Die konvertierte Lösung muss den Abbau 2/775 bzw. den Abbau 1/750(Na<sub>2</sub>) passieren, um die ELK 2/750(Na<sub>2</sub>) zu erreichen. Dabei wird sich die konvertierte Lösung mit alkalischer MgCl<sub>2</sub>-reicher Lösung in diesen Abbauen vermischen bzw. diese konvertierte Lösung stark verdünnt, da das Lösungsvolumen in den genannten Abbauen um ein Vielfaches höher ist als das konvertierte Lösungsvolumen.

Die Löslichkeit fester Silika-Gele in konzentrierten standortspezifischen Salzlösungen ist sehr gering [TUC 2009]. Da der Kontakt zwischen Lösung und Silika-Gel stark eingeschränkt ist, wird das Lösen der Silika-Gele weitgehend verhindert. Die aus einem geringfügigen und sehr langsamen Lösen resultierenden Konzentrationen an Kieselsäure bzw. Silikat in Lösung sind irrelevant für das chemische Milieu im Abbau 1/775 und in der ELK 2/750(Na<sub>2</sub>).

Die Auswirkungen durch die geplanten Versatzinjektionen im Versuchsbereich auf das Milieu in einer ELK oder in einem Transportpfad sind vernachlässigbar.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 32 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

## 5.4.2 Allgemeine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit

Eine erhöhte Basizität der Porenlösung, wie sie durch die Umwandlung von NWG auftreten kann, hat keinen relevanten Einfluss auf die Stabilität der Sorelphasen im Sorelbeton.

Die hohe Basizität der konvertierten Porenlösung in injizierten Versatzkörpern könnte nur beim direkten Abfluss von relativ großen Mengen in benachbarte ELK eine wesentliche Veränderung des chemischen Milieus, insbesondere des pH-Werts, der Lösung-Feststoff-Systeme bewirken. Diese Veränderungen könnten sich signifikant auf Elementlöslichkeiten (Löslichkeitsgrenzen) und Sorption auswirken. Eine Aussage zu Auswirkungen im realen System ist erst dann sinnvoll, wenn die Basizität der konvertierten Porenlösung und die Lösungsmenge sicher prognostiziert werden können. Dazu ist die mineralogisch-chemische Zusammensetzung der zu injizierenden Versatzkörper und des anstehenden Gesteins einzubeziehen. Generell ist vor der Gegenflutung im realitätsfernen Fall ohne Kalisalz (nur Halit) die Basizität der konvertierten Porenlösung durch freie OH<sup>-</sup>-Ionen deutlich höher als bei Anwesenheit von Kalisalz. Durch Reaktion mit Mg- und Ca-Ionen aus den Kalisalzen werden die freien OH<sup>-</sup>-Ionen ausgefällt (siehe Kapitel 2.1 und 4.2). Der Einsatz einer geeigneten Härterlösung, z.B. MgCl<sub>2</sub>- oder CaCl<sub>2</sub>-Lösung, hätte den gleichen Effekt. Spätestens bei der Gegenflutung mit MgCl<sub>2</sub>-reicher Lösung tritt diese Situation ein. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Salzversatz Kalisalze enthält. Bei unbekannter mittlerer Zusammensetzung des Salzversatzes kann auch die Lösungszusammensetzung nach der Reaktion mit NWG, vor der Gegenflutung, nicht abgeschätzt werden. Die Auswirkung einer konvertierten Porenlösung auf das chemische Milieu in den ELK wird aber in jedem Fall für vernachlässigbar gehalten, da vor der Gegenflutung konvertierte Porenlösung wahrscheinlich nicht oder nur in sehr geringer Menge in die ELK gelangen kann. Sollte ein solcher Zufluss nicht auszuschließen sein, könnten bereits relativ geringe Gehalte von Kalisalz im Salzversatz erhebliche Unterschiede der Basizität und Zusammensetzung der konvertierten Porenlösung bewirken. Mit der Gegenflutung MgCl<sub>2</sub>-reicher Lösung werden die Unterschiede, die durch differierende Gehalte von Kalisalzen im Salzversatz verursacht werden, gering und unbedeutend.

Die Bewertung der potenziellen Auswirkungen auf das chemische Milieu in einer ELK ist erst sinnvoll, wenn Planungen zur Durchführung einer Versatzinjektion sowie gesicherte Angaben über die chemische Zusammensetzung des Versatzkörpers vorliegen. Die Prognose möglicher Veränderungen des Milieus und daraus resultierender chemischer Reaktionen erfordert zudem Kenntnisse über die räumliche und zeitliche Entwicklung der Strömungsmuster und Volumenbilanzen. Solche konkreten Angaben liegen nicht vor.

## 5.5 RADIONUKLIDTRANSPORT

Einflüsse von Versatzinjektionen mit NWG auf den Radionuklid-Transport können erst bewertet werden, wenn Angaben zur Durchführung (Ort und Volumen) einer Versatzinjektion vorliegen. Solche konkreten Angaben liegen nicht vor.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 33 von 39 Stand: 30.01.2016	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		

Das direkte Einbringen von NWG in eine ELK wird grundsätzlich ausgeschlossen, so dass die Beurteilung des Einflusses von NWG auf den Radionuklid-Transport innerhalb eines Einlagebereiches obsolet ist.

Eine Beeinflussung des Radionuklid-Transports kann auf den Transportpfaden über Sorption an Silika-Gel und Quarz erfolgen, was positiv zu bewerten wäre. Erkenntnisse über solche Sorptionsprozesse in hochsalinaren Lösungen sind uns vor. Da jedoch für den injizierten Salzversatz von einer geringeren integralen Permeabilität auszugehen ist als für nicht injizierte Versatzkörper und Auflockerungszonen in unmittelbarer Umgebung, wird der Kontakt zwischen Silika-Gel oder Quarz und radionuklidhaltiger Lösung als eher gering eingeschätzt. Somit ist keine nennenswerte Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption an Silika-Gel oder Quarz zu erwarten.

Die zusätzliche Bildung von Brucit und/oder Sorelphasen bei der Reaktion zwischen NWG und Mg- und Ca-Ionen aus Kalisalzen und/oder MgCl<sub>2</sub>-reicher Lösung wird diesbezüglich auch als positiv gewertet, da sich die verfügbaren Mengen an Brucit und/oder Sorelphasen erhöhen. Die Zugänglichkeit dieser Phasen für radionuklidhaltige Lösungen ist jedoch ebenfalls fraglich.

## 5.6 LANGZEITSTABILITÄT

Die Langzeitstabilität des durch die Versatzinjektionen mit NWG neu eingestellten Systems aus Salzgrus und Silika-Gel bzw. Silikaten hängt vor allem von der Umwandlungskinetik der initialen Gelphase über hydrathaltige Cherts bis zum langfristig stabilen Quarz ab.

Aus natürlichen Analoga lässt sich ableiten, dass die für die Umwandlung in Quarz benötigten Zeiträume sehr groß sein werden. In [DBE 2008b] wird Literatur zitiert, in der die Existenz von hydrathaltigen, amorphen Kieselgesteinen („Cherts“) für mehrere zehn- bis hunderttausende Jahre belegt ist. Es ist davon auszugehen, dass diese Umwandlung nach ihrem Einsetzen nicht spontan das gesamte Material erfassen wird, sondern dass die eventuell erst zu späten Zeiten einsetzenden Mineralumwandlungen (Rekristallisation mit gleichzeitiger Dehydratation) langsam voranschreiten.

Eine Beeinflussung der Langzeitstabilität durch Auflösung von Kieselsäure und Silikaten in der Grubenlösung ist nur in geringem Masse zu erwarten, da sowohl die Löslichkeit der amorphen SiO<sub>2</sub>-Phase als auch die von Quarz in Salzlösungen gering ist [TUC 2009] und der injizierte Salzversatz nicht oder nur sehr eingeschränkt von Lösung durchströmt werden wird.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>					
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 34 von 39			
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN				
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016			

## 6 ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG

Die geplanten Versatzinjektionen mit partikelgestützten Brucit-Suspensionen und partikelfreien NWG 50/52 im westlichen Teil von Abbau 1/775, welche im Rahmen eines Technikumsversuchs gemäß Sonderbetriebsplan 24/2008 durchgeführt werden sollen, beeinflussen die Aspekte der Langzeitsicherheit nicht in relevantem Ausmaß. Die Stabilisierung des Tragsystems und die Verringerung des konvergenzwirksamen Volumens sind positive Aspekte, allerdings von insgesamt geringem Einfluss auf das Gesamtsystem.

Das Umströmen des räumlich begrenzten, injizierten Versatzkörpers im Versuchsbereich spielt für die Prognosen der Lösungsbewegungen und des Radionuklid-Transports im Rahmen der Bewertung der Langzeitsicherheit für den Standort keine Rolle. Nennenswerte Einflüsse auf das chemische Milieu in den Einlagerungskammern und relevanten Transportpfaden sind auszuschließen.

Eine umfassende Beschreibung des Versuchsablaufes sowie der geplanten Untersuchungen und Auswertungen liegt nicht vor, unsere Kenntnisse beschränken sich auf die prinzipielle Versuchsanordnung in Abb. 2. Demzufolge ist es uns nicht möglich, die Sinnhaftigkeit und Vollständigkeit des Technikumsversuchs sowie die Zielorientierung der Untersuchungen zu bewerten.

Im Ergebnis der uns vorliegenden Unterlagen zur technischen Umsetzung einer Versatzinjektion zur Reduzierung des Porenraums im Versatzkörper [Asse 2012a], [BfS 2013a] und [BfS 2013b] stellen wir fest, dass wahrscheinlich Defizite zum technischen Verfahren sowie unzureichende Erkenntnisse bezüglich des Eindringvermögens und der Eindringtiefe von NWG in Salzversatz sowie bezüglich der mit vertretbarem Aufwand erreichbaren integralen Versatzporosität bestehen. Sollte sich der Technikumsversuch diesen Aspekten widmen, wäre der Durchführung zuzustimmen.

Wenn es sich bei dem Technikumsversuch um ein Experiment handelt, wie der Name nahelegt, sind die Fragestellungen, die durch den Versuch beantwortet oder widerlegt werden sollen, zu benennen. Das erfolgt im Sonderbetriebsplan 24/2008 und den ergänzenden Unterlagen nicht. Einige Fragen sollen im Rahmen des Technikumsversuchs beantwortet werden, um die generelle Durchführbarkeit und Erfolgshöflichkeit mehrstufigen Versatzinjektionen mit NWG zu belegen, beispielsweise:

- Haben die Brucit-Suspensionen der Verdichtungsinjektion(en) die Hohlräume in den Randbereichen und die hochdurchlässigen Bereiche des Versatzkörpers vergütet oder ist dort auch NWG bzw. Silika-Gel zu finden?
- Welche Festphasen dominieren im injizierten Versatzkörper?
- Inwieweit lässt sich der Porenraum des Versatzkörpers mit vertretbarem technischen Aufwand verringern?
- Wird bei Poreinjektionen mit NWG der Porenraum im Salzversatz mit vertretbarem Aufwand weitgehend erreicht und wie lässt sich dies nachweisen?

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>				<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 35 von 39	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016	

- Wie ist der Kontakt von Brucit bzw. Sorelphasen und NWG bzw. Silika-Gel sowohl mineralogisch als auch hydraulisch zu beurteilen?
- Hat sich Natronlauge gebildet?

Die Diskussion der generell zu erwartenden Auswirkungen derartiger Versatzinjektionen auf die Lösung-Feststoff-Systeme im Nahbereich der Einlagerungskammern zeigt bereits heute, dass die sinnvolle Planung von Versatzinjektionen in jedem Fall einer Einzelfallprüfung bedarf. Für eine belastbare Bewertung der Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit wären konkrete Planungskennziffern für Ort, Volumina und Zielparameter der Versatzkörper sowie Kenntnisse der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung des Salzversatzes und des anstehenden Gesteins erforderlich.

Die Stabilisierung des Tragsystems und die Verringerung des konvergenzirksamen Volumens stellen – wie beim geplanten Technikumsversuch – in jedem Fall positive Aspekte hinsichtlich der Langzeitsicherheit dar. Diese positiven Auswirkungen werden schon durch die Verdichtungsinjektionen mit Brucit-Suspensionen erreicht. Inwieweit Poreninjektion mit NWG eine weitere relevante Vergütung eines Versatzkörpers bewirken und ob sich dies signifikant auf die Langzeitsicherheit (z.B. auspressbare Lösungsmengen und Volumenströme) auswirkt, ist bisher nicht bekannt. Bezüglich der Poreninjektion sollten Abwägungen zwischen erreichbarer Verbesserung und vertretbarem technischen Aufwand erfolgen; nicht unbeachtet bleiben darf der Einfluss von Injektionsbohrungen.

Die Bewertung der Auswirkungen auf Hydraulik, chemisches Milieu und Radionuklidtransport muss ortsspezifisch vorgenommen werden. Hierfür sind konkrete Angaben zu Ort und Volumen des zu injizierenden Versatzkörpers notwendig, die nicht vorliegen. Für Versatzinjektionen, die relevante Transportpfade für kontaminierte Lösung aus den Einlagerungskammern betreffen, ist hinsichtlich der Langzeitsicherheit eine Abwägung vorzunehmen, ob der Reduzierung des Porenvolumens verbunden mit der Verringerung von Konvergenz und Volumenstrom oder dem größeren verdünnungs- und transportwirksamen Porenvolumen – beim Verzicht auf die Versatzinjektion – der Vorzug zu geben ist. Hierzu sind wahrscheinlich Modellrechnungen notwendig.

Im Transportpfad für kontaminierte Lösung aus den Einlagerungskammern sind Kanalisierungseffekte von besonderer Bedeutung für Lösungsbewegungen und Transport. Während durch die Verdichtungsinjektionen mit Brucit-Suspensionen bevorzugt die höher durchlässigen Bereiche des Versatzkörpers erreicht werden, wodurch eine Kanalisierung der Lösungsbewegung im Versatzkörper eingeschränkt wird, können bei den folgenden Poreninjektionen mit NWG nicht injizierte Bereiche des Versatzkörpers Kanalisierungsbahnen bilden, in denen der Transport beschleunigt und das verdünnungswirksame Lösungsvolumen deutlich reduziert wird. Ob bei Poreninjektionen mit vertretbarem technischem Aufwand der gesamte Versatzkörper von NWG erreicht werden kann, soll belegt werden. Die vorliegenden Erkenntnisse zu Eindringvermögen und Eindringtiefe von NWG in Salzgrus lassen einen hohen technischen Aufwand und eine Vielzahl von Injektionsbohrungen für ein weitgehendes Erreichen des Porenraums im Eigenversatz erwarten. Bezüglich der Poreninjektionen mit NWG soll geprüft werden, ob der Nutzen für die Notfall- und Langzeitsicherheit den hohen technischen Aufwand rechtfertigt.



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 36 von 39
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00		Stand: 30.01.2016

Aus NWG werden sich mittelfristig Silika-Gele bilden, welche über lange Zeiträume zu Quarz kristallisieren können. Die chemische Langzeitstabilität von Silika-Gel bzw. Quarz ist für die chemischen Bedingungen am Standort Asse gegeben. Volumenveränderungen, welche im Zuge der Rekristallisation vom Silika-Gel zum stabilen Quarz eintreten, dürften durch die Konvergenz weitgehend ausgeglichen oder überdeckt werden.

 <b>Bundesamt für Strahlenschutz</b>			<b>Bewertung der geplanten Versatzinjektion von          Natronwasserglas in den Salzversatz in der          Schachanlage Asse II</b>			
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 37 von 39 Stand: 30.01.2016
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

- [AG 2012] Asse – Anforderungen an und Zielsetzungen für das Mg-Depot; Arbeitsgemeinschaft AF-Consult Baden, GRS mbh Braunschweig, KIT-INE Karlsruhe, IfG Leipzig, Bericht AF 1764/21, GRS 550800-12, 17.08.2012.
- [Asse 2009] Schachanlage Asse II – Sonderbetriebsplan 24/2008, Anwendungsbezogene Injektionsversuche in carnallitischen und polyhalitischen Gebirgsbereichen der 775-m-Sohle und der 800-m-Sohle, hier Abänderung betr. der Verlegung des; Versuchsortes für Abdicht- und Prüfdruckinjektionen in carnallitisches Gebirge von der 775-m-Sohle zur 800-m-Sohle in Verbindung mit Bereinigung des Antrags Nr.24/2008. Zechenbuch Nr. W 5010.1.21, BfS-KZL 9A/13223000/DB/GC/0036/00, Asse-GmbH, 11.12.2009.
- [Asse 2010] Notfallplanung zur Konsequenzenminimierung; Asse-KZL 9A/23700000/BAU/GH/BZ/0003/00, Asse-GmbH, Februar 2010.
- [Asse 2012a] Schachanlage Asse II – Sonderbetriebsplan 24/2008, Anwendungsbezogene Injektionsversuche in carnallitischen und polyhalitischen Gebirgsbereichen der 775-m-Sohle und der 800-m-Sohle; Mitteilung über a) die Erweiterung des Bohrfächers 3 (TVF V, IV 1.1a - 1.5a) und b) den Einsatz des Injektionsmörtels MFBBa 17/3/30. Zechenbuch Nr. W 5010.1.21.W 5010.1.25, BfS-KZL 9A/13223000/DB/GC/0138/00, Asse-GmbH, 18.06.2012.
- [Asse 2012b] Hohlraumbilanz für die Schachanlage Asse und Abschätzung der Volumina zur Umsetzung der Maßnahmen zur Konsequenzenminimierung (Notfallplanung); BfS-KZL 9A/64140000/GB/R/0011/00, Asse-GmbH, BfS Salzgitter, Januar 2012.
- [BEN 1983] Kenyaite – synthesis and properties. American Mineralogist, 68, 818-826.
- [BfS 2013a] 8. Projektgespräch Bau von Strömungsbarrieren zur Notfallvorsorge; Protokoll zur Sitzung vom 06.11.2012, BfS Salzgitter, 14.01.2013.
- [BfS 2013b] 13. Projektgespräch Bau von Strömungsbarrieren zur Notfallvorsorge; Protokoll zur Sitzung vom 10.09.2013, BfS Salzgitter, 06.11.2013.
- [BOR 2010] Borstel, L.E., Engelhardt, H.J., Schirmer, T.(2010): Sorelphasenneubildungen bei der Reaktion von Natronwasserglas mit MgCl<sub>2</sub>-reichen Mineralen und Salzlösungen. Monographie GDCh 42 aus: Tagung Bauchemie der GDCh-Fachgruppe Bauchemie vom 7. bis 8. Oktober 2010, Dortmund. Hrsg.: Gesellschaft Deutscher Chemiker – GDCh –, Fachgruppe Bauchemie, Frankfurt/Main, Selbstverlag 2010.
- [DBE 2007a] (2007): Vorversuch Injektionen auf der 750-m-Sohle des FB Asse, Doku.-Kennz. 10/77725/BSB/GH/BY/0001/00, GSF Schachanlage Asse, DBE Technology GmbH, Peine, Stand 05.06.2007.
- [DBE 2007b] (2007): Bautechnische Anwendungsgrenzen von Injektionen, Doku.-Kennz. A/VER/GH/BY/0006/00, DBE Technology GmbH, Peine, Stand 27.04.2007.



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 38 von 39
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016

- [DBE 2008a] - (2008): Injektionen am WLS-775-2 – Vorratsbunker/Blindschacht 4, Doku.-Kennz. 10/77725/BSB/GH/BY/0002/00, Helmholtz Zentrum München Schachanlage Asse, DBE Technology GmbH, Peine, Stand 18.01.2008.
- [DBE 2008b] - (2008): Langzeitstabilität von Natron-Wasserglassystemen in MgCl<sub>2</sub>-Lösungen (Schutzfluid), Doku.-Kennz. 10/77725/BSB/CC/BW/0006/00, Helmholtz Zentrum München Schachanlage Asse, DBE Technology GmbH, Peine, Stand 10.01.2008.
- [DBE 2011] - (2011): Vergütung der Auflockerungszone im Salinar (VerA) – Abschlussbericht, TEC-13-2011-AB, DBE Technology GmbH, Peine.
- [DBE 2012] - (2012): Planungen zum Mg-Depot, Versuche zum Nachweis der Machbarkeit – Abschlussbericht zum Versuch Nr.2 (Injektionsversuch), Doku.-Kennz. 9A/4416000/MOD/GH/BY/0002/00, Asse-GmbH, DBE Technology GmbH, Peine, Stand 01.02.2012.
- [INE 2006] Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachanlage Asse: Berechnung des Radionuklid-Quellterms auf Grundlage der Verfüllkonzepte G und MAW. Abschlussbericht FZK-INE 008/05; Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE), 2006.
- [ILE 1979] Iler, R.K. (1979): The chemistry of silica. Wiley Interscience, New York, USA, (1979).
- [KRA 1998] Krainer, K. & Spötl, Ch. (1998): Abiogenic silica layers within a fluvio-lacustrine succession, Bolzano Volcanic Complex, northern Italy: a Permian analogue for Magadi-type cherts? Sedimentology, 45, 489-505.
- [MAR 1980] Marshall, W. L. & Warakomski, J. M. (1980): Amorphous silica solubilities -- II. Effect of aqueous salt solutions at 25 C. Geochimica and Cosmochimica Acta, vol. 44, no. 7, pp. 915-924.
- [MAT 1987] Matthes, S. (1987): Mineralogie, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin.
- [PQC 2001] PQ Corporation: EcoDrill – Silicate Drilling Fluids technologies. Productinformation, 2001.
- [PQC 2007] PQ Corporation: Typical Property Data for PQ® Liquid Sodium Silicates. Bulletin 17-2A, 2007.
- [SEB 2001] Sebag, D., Verrecchia, E. P., Lee, S.-J. & Durand, A. (2001): The natural hydrous sodium silicates from the northern bank of Lake Chad: occurrence, petrology and genesis. Sedimentary Geology, 139/1, 15-31.
- [STO 1988] Stoessel, R. K. (1988): 25 C and 1 atm dissolution experiments of sepiolite and kerolite. Geochimica and Cosmochimica Acta, 52, 365 - 374.



Bundesamt für Strahlenschutz

## Bewertung der geplanten Versatzinjektion von Natronwasserglas in den Salzversatz in der Schachtanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 39 von 39
9A	342 160 00	GH	RZ	0027	00	Stand: 30.01.2016

[TUC 2009]

..: Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Silikatgel in  $MgCl_2$ -haltigen Lösungen; TU Clausthal, Institut für Endlagerforschung, Stand 05.11.2009.